

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Сургутский государственный университет ХМАО-Югры  
Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований  
Российская ассоциация нейроинформатики  
ООО «Медуза»

# **НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2021**

**ТРУДЫ  
VII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ**

Нижний Новгород  
ИПФ РАН  
2021

УДК 159.9.07(063)  
ББК 88.25я431  
Н49

Издано по решению редакционно-издательского совета  
ФИЦ Институт прикладной физики РАН

Ответственные редакторы:  
доктор физико-математических наук **В.А. Антонец**,  
доктор биологических наук **С.Б. Парин**,  
доктор физико-математических наук **В.Г. Яхно**

Редакционная коллегия  
*Н.Н. Кралина, И.В. Нуйдель, С.Б. Парин, С.А. Полевая*

Проведение конференции и издание сборника научных трудов стали возможны  
благодаря гранту № 14.У26.31.0022 Министерства образования и науки Российской Федерации

Н49 **Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2021** : труды VII Всероссийской конференции / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики РАН [и др.] ; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. – Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2021. – 219 с.

ISBN 978-5-8048-0111-4

Сборник научных трудов содержит доклады VII Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2021» (Нижний Новгород, 20–24 сентября 2021 г.). Конференция посвящена текущему состоянию, перспективам и новым возможностям экспериментальных исследований и формализованного описания когнитивных процессов, а также проблемам создания симуляторов живых систем.

В сборник включены доклады по следующим темам: механизмы и модели адаптивных и ментальных процессов в когнитивных системах; подходы и инструменты для исследования функциональной динамики живых и технических когнитивных систем; прикладные вопросы моделирования и регистрации когнитивных процессов.

УДК 159.9.07(063)  
ББК 88.25я431

## Программный комитет конференции

### *Председатель:*

**Киреев Максим Владимирович** (ИМЧ РАН, Санкт-Петербург)

### *Сопредседатели:*

**Александров Юрий Иосифович** (ИП РАН, Москва)

**Анохин Константин Владимирович** (ИПИМ МГУ им. М.В. Ломоносова;  
ИНФ им. П.К. Анохина, Москва)

**Ушаков Вадим Леонидович** (НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

**Черниговская Татьяна Владимировна** (ИКИ СПбГУ, Санкт-Петербург)

**Шумский Сергей Александрович** (ФИ РАН, Москва)

### *Члены программного комитета:*

**Антонец Владимир Александрович** (ННГУ; ИПФ РАН, Нижний Новгород)

**Величковский Борис Митрофанович** (НИЦ «Курчатовский институт», Москва)

**Григорьева Вера Наумовна** (ПИМУ, Нижний Новгород)

**Горбань Александр Николаевич** (Университет Лестера, Великобритания; ННГУ)

**Дорожкин Александр Михайлович** (ННГУ, Нижний Новгород)

**Дунин-Барковский Виталий Львович** (НИИСИ РАН, Москва)

**Жданов Александр Аркадьевич** (ИТМиВТ РАН, Москва)

**Еськов Валерий Матвеевич** (СурГУ, Сургут)

**Иваницкий Алексей Михайлович** (ИВНДиНФ РАН, Москва)

**Иванченко Михаил Васильевич** (ННГУ, Нижний Новгород)

**Казанцев Виктор Борисович** (ННГУ, Нижний Новгород)

**Кибрик Андрей Александрович** (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва)

**Крылов Андрей Константинович** (ИП РАН, Москва)

**Полевая Софья Александровна** (ННГУ, Нижний Новгород)

**Парин Сергей Борисович** (ННГУ, Нижний Новгород)

**Ратушняк Александр Савельевич** (КТИ ВТ СО РАН, Новосибирск)

**Редько Владимир Георгиевич** (НИИСИ РАН, Москва)

**Самарин Анатолий Иванович** (НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону)

**Сергеев Александр Михайлович** (РАН, Москва)

**Ситникова Евгения Юрьевна** (ИВНДиНФ РАН, Москва)

**Станкевич Лев Александрович** (СПИИ РАН, Санкт-Петербург)

**Федотчев Александр Иванович** (ИБК РАН, Пущино)

**Цукерман Валерий Давидович** (Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ, Ростов-на-Дону)

**Чернавская Ольга Дмитриевна** (ФИ РАН, Москва)

**Яхно Владимир Григорьевич** (ИПФ РАН, Нижний Новгород)

## **Оргкомитет конференции**

<b>Яхно Владимир Григорьевич</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	<i>– председатель</i>
<b>Парин Сергей Борисович</b> (ННГУ, Нижний Новгород)	<i>– зам. председателя</i>
<b>Нуйдель Ирина Владимировна</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	<i>– ученый секретарь</i>
<b>Антонец Владимир Александрович</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	
<b>Беллюстин Николай Сергеевич</b> (ННГУ, Нижний Новгород)	
<b>Воловик Михаил Григорьевич</b> (ПИМУ, Нижний Новгород)	
<b>Стасенко Сергей Викторович</b> (ННГУ, Нижний Новгород)	
<b>Ковальчук Андрей Викторович</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	
<b>Полевая Софья Александровна</b> (ННГУ, Нижний Новгород)	
<b>Соколов Максим Евгеньевич</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	
<b>Тельных Александр Александрович</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	
<b>Шемагина Ольга Владимировна</b> (ИПФ РАН, Нижний Новгород)	

**Электронный адрес оргкомитета:** [nuidel@ipfran.ru](mailto:nuidel@ipfran.ru)  
**Веб-сайт конференции:** <http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2021/>



*Дорогие коллеги!*

*Прошло уже почти полтора десятка лет со времени нашей первой конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». А кажется, это было вчера...*

*В первую очередь хочется поблагодарить тех, чье сочувствие, деятельное участие и поддержка обеспечили саму возможность создания и многолетнего существования нашего научного форума. Это прежде всего Татьяна Владимировна Черниговская, которая, будучи на тот момент президентом МАКИ, не только дала добро на наше «азартное» предприятие, но и своим авторитетом обеспечила внимание специалистов по когнитивным исследованиям к новорожденной конференции. Это тогдашний заместитель директора ИПФ РАН по научной работе Александр Михайлович Сергеев, сумевший внедрить в сознание всего руководства сугубо физического прикладного института чуждое физикам в то время понятие «когнитивного» и неизменно поддерживающий это направление словом и делом. Это Константин Владимирович Анохин, организационные идеи которого позволили значительно повысить интерес к нашему собранию энтузиастов. Это Юрий Иосифович Александров; возглавляемый им неизменный «десант» учеников и коллег позволяет психофизиологам не чувствовать себя чужими на празднике жизни нейробиологов и физиков.*

*Это президент-основатель МАКИ Борис Митрофанович Величковский и президент-основатели Ассоциации нейроинформатики Борис Владимирович Крыжановский и Виталий Львович Дунин-Барковский, чей опыт бесценен для нашей конференции.*

*Это их последователи и коллеги – Вадим Леонидович Ушаков, Валерий Матвеевич Еськов, Георгий Алексеевич Иваницкий, Александр Савельевич Ратушняк, Владимир Георгиевич Редько, Сергей Александрович Шумский, Лев Александрович Станкевич и многие другие, кто привносит на наш форум дух родственных конференций.*

*Мы печалимся о разрушении традиции уникальной международной конференции по нейрокibernетике в Ростове-на-Дону и благодарны южным коллегам (прежде всего Анатолию Ивановичу Самарину и Валерию Давидовичу Цукерману) за своеобразную, пусть и грустную, эстафету.*

*Мы скорбим о невозможности восполнить потери друзей в последние годы. Мы потеряли блестящих исследователей Любовь Николаевну Подладчикову, Татьяну Александровну Запару, Екатерину Дмитриевну Каземирову, Михаила Яковлевича Эйнгорина. Мировая биофизика утратила одного из крупнейших мыслителей Дмитрия Сергеевича Чернавского. Большое направление исследований, связанных с эпилептическими процессами, заложила Галина Дмитриевна Кузнецова.*

*Теперь на нашей конференции под руководством ее ученицы, Евгении Юрьевны Ситниковой, организован симпозиум «Нелинейная динамика в исследованиях патологических процессов головного мозга» для обсуждения результатов в этой области.*

*Двадцатые годы двадцать первого века начались непредсказуемыми испытаниями... Тем важнее поддерживать традицию наших собраний. Сегодня в условиях усиливающейся изоляции принципиально необходимой является возможность тесного научного общения специалистов разных направлений когнитивной науки. Основная задача нашей конференции остается прежней: обеспечить творческое взаимодействие представителей самых разных научных специальностей. Проблема Вавилонского столпотворения в когнитивных исследованиях по-прежнему требует своего решения. Опыт нашей конференции позволяет надеяться, что физики, математики, нейробио-*

логи, психофизиологи, лингвисты, философы и даже психологи и врачи могут научиться слышать друг друга именно в условиях тесного языкового общения. Этому призван способствовать относительно камерный характер нашего форума: программа принципиально не предполагает параллельные заседания разных секций. Последовательные секции «вынуждают» каждого слушать других участников. Отсюда – множество вопросов, отсюда – острые дискуссии.

И хотя общее количество докладчиков традиционно около ста человек, а докладов и того меньше, это позволяет успешнее понять друг друга. Круг узок, но ведь и слой тонок. Не так много в нашей стране (да и за рубежом тоже) людей, искренне и прицельно занимающихся проблемами познания и сознания и уж в особенности попытками формализации этих феноменов. Тем ценнее наши встречи!

И два слова о географии докладов. Традиционно на нашей конференции широко представлены главные научные центры страны: Москва и Санкт-Петербург. Это и академические институты, и ведущие вузы. Активно участвуют наукограды: Пуцинский, Новосибирский, Томский, Саратовский. В целом география участников весьма обширна, охватывает и европейские, и сибирские, и даже дальневосточные научные центры.

Естественно, нижегородская наука на правах принимающего гостей организатора по традиции представлена докладами практически из всех основных вузов города (Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева, Нижегородский лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова, Нижегородский архитектурно-строительный университет, Приволжский исследовательский медицинский университет и др.) и институтов Российской академии наук.

Безусловно, эпидемическая обстановка наложила свой отпечаток на многообразие состава зарубежных участников: в этом году мы приветствуем доклад из Германии 2-жи Нины Шалваевны Александровой.

В любом случае эпидемии приходят и уходят. Наша задача – сохранить традицию встреч на гостеприимной Нижегородской земле!

С искренним уважением, В.А. Антонец, С.Б. Парин, С.А. Полевая, В.Г. Яхно

## Спонтанное знание. Что мы сейчас о нем знаем?

Н.Ш. Александрова

Sprachbrücke e.V. Berlin

Выготский [1], сравнивая способы приобретения языка (логический способ – изучение иностранного языка и натуральный – освоение языка в живой среде), отмечает их взаимозависимость и противоположную направленность и проводит аналогию с развитием научных и спонтанных (житейских) понятий: «...между этими противоположно направленными путями развития существует обоюдная взаимная зависимость, точно так же, как между развитием научных и спонтанных понятий...» [1, с. 245]. Спонтанные (житейские) понятия приобретаются и используются в быту, а научные понятия – это термины, встроенные в систему знаний. Выготский подчеркивает, что значения научных понятий осознаются первыми и осознанность значений научных понятий постепенно распространяется и на житейские. «Развитие научных понятий начинается в сфере осознанности и произвольности и продолжается далее, прорастая вниз в сферу личного опыта и конкретности. Развитие спонтанных понятий начинается в сфере конкретности и эмпирии и движется в направлении к высшим свойствам понятий: осознанности и произвольности». В отношении научных понятий Выготский подчеркивает, что «...гипотетический путь развития научных понятий представляет собой только частный случай более обширной группы процессов развития, относящийся к развитию, источником которого является систематическое обучение...» [1, с. 244]. Как мы видим, Выготский фактически говорит о двух путях познания: путь, генерирующий спонтанные понятия, и процессы развития, источником которых является систематическое обучение. В этом противопоставлении нетрудно увидеть дихотомию *специфика вида – пластичность мозга*, описанную позже Леннебергом [2]. Видоспецифическое поведение в понимании Леннеберга и в данной работе – это набор поведенческих характеристик, обязательных для здорового представителя вида. Это способность летать, каркать и строить гнездо для вороны, бегать и лаять для собаки и т. п. При нарушении любой из видоспецифических характеристик животное как минимум инвалид. Некоторые видоспецифические характеристики являются врожденными, формирование других происходит в процессе развития как созревание. Человек рождается способным видеть и слышать, а становление вербальной коммуникации и ходьбы, которые, согласно Леннебергу, являются видоспецифическим поведением *Homo sapiens*, происходит как созревание в определенные природой сроки. Видоспецифическое поведение не может быть забыто и нарушается только при патологии. На каждом уровне становления двигательных и речевых навыков, достиг-

нутом в результате созревания, пластичность мозга предоставляет окружающей среде возможность развивать и совершенствовать их. Так, приобретение спортивных навыков или изучение иностранного языка возможно благодаря пластичности мозга. Эти навыки приобретаются осознанно, произвольно в процессе обучения и могут быть забыты без повторения и тренировок.

Непроизвольное формирование у ребенка спонтанных (житейских) понятий – это, несомненно, видоспецифическая характеристика человека. Без спонтанных понятий ребенок не может быть здоров, спонтанные понятия в дальнейшем служат основой для становления научных понятий.

Для становления науки необходим определенный уровень развития общества. Наши предки выживали в суровых условиях окружающей среды без науки и попутно науку создавали. То есть человек научился взаимодействовать с окружающей средой и во многом понимать суть природных явлений без научных расчетов и прогнозов. На основании какого познавательного механизма это возможно? Есть ли он у нас сейчас? Вероятно, этот механизм есть и мы им нередко пользуемся. Это способность уловить суть явления по единичным разрозненным фактам, которую можно назвать «и так ясно». Даже в научных кругах иногда можно услышать вопрос – зачем тратить время и исследовать, подсчитывать, доказывать то, что «и так ясно»? Например, исследование полтора миллиона мигрантов в США подтвердило то, что было «и так ясно»: способность освоить новый язык снижается с возрастом. Вероятно, к спонтанному знанию можно отнести то, что мы называем интуицией и здравым смыслом.

В настоящее время активно исследуется доречевое развитие ребенка – важнейший этап жизни, когда происходит становление контакта ребенка и окружающих. Ахутина и др. [3] комментируют работу М. Томаселло [4]: «...понимание интенций других и построение совместных намерений представляют базовую структуру социальных действий и коммуникации... владение базовой структурой позволяет ее участникам создавать с другими людьми совместные смысловые пространства, или совместные знания (shared conceptual spaces). ...Совместное внимание и совместные знания создают контекст, который позволяет детям соотносить слово и значение». Нарушение развития на этом этапе может привести к раннему аутизму и серьезно затруднить становление речи. Понимание намерений других людей и общего контекста происходящего – необходимое условие адекватного поведения человека в течение всей жизни. И эта способность затребована в человеческой жизни не время от времени, а постоянно.

Еще одна наша человеческая особенность, которая с развитием науки никак не связана, – быстрота, мгновенность, спасительность реакций в экстремальных ситуациях, которая и обеспечивает счастливый финал многих самых разных происшествий.

Спонтанное знание – это, по сути, видовое знание *Homo sapiens*, биологическое назначение которого – выживание вида. Это постоянная непроизвольная оценка мира вокруг и своего места в нем и способность реагировать без раздумий в опасных ситуациях. Это глубинное знание (часто без возможности логически объяснить), что является правильным, естественным, полезным для нас как представителей вида *Homo sapiens*, а что является противоестественным и вредным. Вероятно, спонтанное знание многолико и изменяется, развивается с возрастом в процессе взаимодействия с навыками и знаниями, приобретенными в течение жизни. Вероятно, спонтанное знание является основой, которая определяет общее в поведении людей разных эпох и культур во всем, что связано с продолжением рода и возвращением нового поколения.

Процесс научного познания изучен в настоящее время несравненно глубже, чем познание спонтанное. Вероятно, осознание научных понятий опережает осознание спонтанных не только при индивидуальном развитии, но и в историческом плане. Но непроизвольные процессы все больше привлекают внимание исследователей. Открыты и изучаются зеркальные нейроны, активно исследуется раннее, доречевое развитие детей, внимание ученых привлекает интуиция. Понятно, что это только начало исследования процессов, которые настолько обыденны для человека, что их первостепенная значимость для человеческой жизни только-только начинает проявляться.

### Литература

1. *Выготский Л.С.* Мышление и речь. Изд. 5, испр. М.: Лабиринт, 1999. 352 с.
2. *Lenneberg E.H.* Biologische Grundlagen der Sprache. Frankfurt a. M., 1972.
3. *Ахутина Т.В. и др.* Предпосылки и ранние этапы развития речи: новые данные // Вопросы психолингвистики. 2013. № 1(17). С. 20–42.
4. *Томаселло М.* Истоки человеческого общения. М., 2011.

# Евразийские потопаы и новая парадигма древней истории Евразии

А.А. Абрашкин

НИУ ВШЭ, Нижний Новгород, email: aabrashkin@hse.ru

В 1999 году тиражом всего в 1000 экземпляров вышла книга Михаила Григорьевича Гросвальда «Евразийские гидросферные катастрофы и оледенение Арктики». Она осталась незамеченной специалистами и неизвестна широкому кругу читателей. Но ее научное значение огромно. Доктор геолого-минералогических наук Владимир Павлович Полеванов отмечает: «Теория Гросвальда убрала многочисленные геологические “нестыковки” в изучении последнего ледникового периода, объяснила, почему так широко распространена легенда о потопах. Я не сомневаюсь, что ее время еще впереди. Эта теория выходит далеко за рамки геологии. Она объясняет происхождение иранских солевых пустынь, резкие колебания уровня Каспия, тайну нахождения в одних захоронениях мамонтов и китов, откуда взялось Аральское море и озеро Балхаш, как возникли проливы Босфор и Дарданеллы...»

Суть этой теории состоит в том, что во время существования континентального ледника на территорию Евразии обрушивались страшные потопаы, когда воды Северного Ледовитого океана неслись с севера на юг, сметая все на своем пути. Гросвальд называет шесть дат – 19,4; 18; 14,2; 11,5; 9,6; 7,6 тысяч лет назад. Полеванов, один из наиболее авторитетных экспертов в этой области, пишет: «Нельзя сказать, что о гидросферных катастрофах ничего не было известно и до открытия Гросвальда. И наши, и американские геологи изучили следы прорывов ледниково-подпрудных озер в горных районах мира. Полигоном в России является Горный Алтай. Цифры, которые там были получены, впечатляли, особенно в сравнении с крупнейшими реками мира. Что значат жалкие цифры расхода воды 370 тыс. м<sup>3</sup>/сек реки Амазонки по сравнению с 18 млн м<sup>3</sup>/сек Чуйско-Курайского озера на Алтае или 17 млн м<sup>3</sup>/сек озера Миссула в США! Российские ученые пришли к выводу, что минимум пять раз за последние 25 тыс. лет катастрофически осушались ледниково-подпрудные озера Горного Алтая. За день-два в предгорьях вырывались объемы воды в 10–20 тыс. км<sup>3</sup>. Гидросферные катастрофы, установленные Гросвальдом, объяснили шесть катастрофических подъемов уровня Мирового океана за те же 25 тыс. лет! В зарубежной геологической литературе эти события так и были обозначены – catastrophic rising extent (CRE); во времена некоторых CRE уровень всего Мирового океана поднимался до 30 м... Воды горно-озерных катастроф явно не хватало (для объяснения потопаов – А.А.). Гросвальд со своей теорией подоспел очень вовремя. Необходимая вода для “апокалипсиса” нашлась. Такие гигантские запасы могли скопиться только в подпрудном Северном Ледовитом океане».

Режим «подпрудного озера» в Ледовитом океане возник в определенный момент ледникового периода, когда растущие год от года льды перекрывали на западе пролив Фрама (между Гренландией и Шпицбергенем), а на востоке – Берингов пролив (см. рис. 1). Льды препятствовали оттоку воды в соседние океаны, и, как результат, океан начинал «вспухать» единым Центрально-Арктическим ледником (он покрывает Северный полюс). За 2–3 тысячи лет ледник поднимался до высоты 800–1300 метров. Давление его на воду, находившуюся под ледяной «шапкой», становилось огромным. В период потепления климата, когда континентальный ледник начинал подтаивать, вода вырывалась из-под него, образуя стремительно несущуюся «стену» потопа. На его конечной стадии, когда обрушивалась ледяная шапка-гора, поток представлял водно-ледяную «кашу».

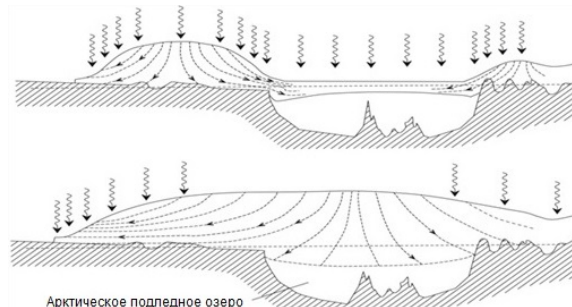
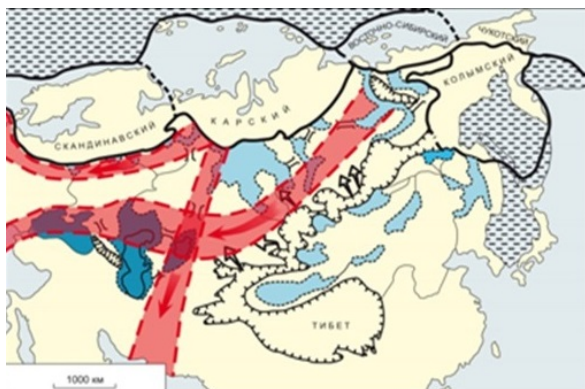


Рис. 1. Эволюция Панарктического ледяного покрова. Вверху – начало роста Центрально-Арктического шельфового ледника; внизу – стадия сверхщита с вершиной у Северного полюса. Высота – 4–5 км

Согласно Гросвальду, на протяжении 5–7 тысяч километров поток воды шириной до 1000 км и глубиной 200–500 м несся со скоростью 120 км/ч. Вместе с объемом 1–3 млн км<sup>3</sup> воды переносилось 2–5 млн км<sup>3</sup> льда (см. рис. 2). «Вздыбленная стена воды с миллионами кубометров льда рвалась в океан, разрушая все на своем пути. Более того, при такой глубине и скорости потока возникает так называемое холодное кипение воды – кавитация. В бурлящем потоке пузырьки от высокого давления схлопываются, излучая ударную волну. Это явление многократно увеличивает и без того гигантскую разрушительную силу потока. Вода буквально приобретает свойства динамита. В минуты и часы прорезаются самые твердые горные породы, в дни образуются проливы – Босфор и Дарданеллы, мгновенно заполняются моря и озера – Черное, Аральское, Каспийское, Балхаш... Дальше вода уже хлещет через европейскую Россию и в зависимости от того, какой ледниковый щит коллапсировал первым, рвется к Атлантике.



**Рис. 2.** Катастрофа. Прорыв Арктического подледного озера. Сброс миллионов кубометров воды и льда в Атлантический или Индийский океаны вследствие разрушения Панарктического ледникового покрова. Направления движения потоков указаны стрелками (ширина полос в масштабе)

Это происходит либо северным путем между югом Балтийского моря и Альпами, либо южным – через Черное море, Босфор – Дарданеллы, не щадя Грецию, Турцию и соседние территории. При прорыве Карского ледника эти миллионы кубокilометров воды со льдом мчались на юг через Казахстан, Узбекистан, Туркмению, Иран в Персидский залив и Аравийское море» (В.П. Полеванов).

Гросвальдовские потоки, как пушинки, переносили камни и валуны, которыми усеяна Русская равнина. И не подходили к нашему городу ледяные горы высотой в сотни метров. Иногда и академики выступают в роли андерсенов, это не первый и не последний раз. Правда, пока они и их ученики еще возглавляют институты и кафедры, теория Гросвальда будет замалчиваться. Но главное, мы получаем дополнительный ключ к пониманию перемен, которые происходили на территории Русской равнины. Как видно из рис. 2, через нее прокатывались три рукава потока. Уберечься от катаклизма можно было только на горах и отдельных возвышенностях. Но спасшимся еще нужно было выжить в новых условиях.

Исследователи-историки, как правило, отслеживают изменение климата и связанных с этим условий обитания человека на данной территории. Фактор евразийских потоков не принимается ими в расчет. А он в финальной стадии палеолита и мезолите имел колоссальное значение. В докладе обсуждается, как идея евразийских потоков изменяет представления об истории Евразии в X–V тыс. до н.э. Дано оригинальное решение вопроса о прародине индоевропейских народов, которую мы связываем с Русской равниной.

# О диапазоне применимости теории Фишера

А.К. Алексеев

МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область

Современная теория информации началась с работ Хартли [1] и Шеннона [2] и первоначально называлась теорией передачи информации (*theory of information transmission* [1], *theory of communication* [2]). Потом название укоротилось, что привело к некоторому размытию его смысла. Действительно, эта теория ориентирована именно на *передачу* информации (кодирование, сжатие данных, помехоустойчивость) без связи с каким-либо содержанием. Количество информации Шеннона, содержащееся в некотором тексте длиной  $m$  знаков, имеющих вероятность появления  $P_i$ , имеет вид

$$I_{Sh} = -\sum_i^m P_i \text{Log}_2 P_i. \quad (1)$$

Из этого определения видно, что при перестановке символов местами количество информации не изменится. Это достаточно парадоксальный результат, так как с точки зрения интуиции трудно согласиться с тем, что количество информации в телефонном справочнике не изменится при случайной перестановке чисел в номерах. Это обстоятельство было понятно с самого начала: *“It is surprising but true that, from the present viewpoint, two messages, one heavily loaded with meaning and the other pure nonsense, can be equivalent as regards information”* [3].

Эти несколько парадоксальные свойства отсутствия смысла в информации полностью относятся ко всем понятиям количества информации в версии Колмогорова (комбинаторной, вероятностной и алгоритмической информации) [4].

В противоположность этому интуитивное и повсеместно распространенное понятие информации относится к чему-то качественно иному, типа рецепта, инструкции и вовсе не допускает отсутствия смысла [5, 6]. С точки зрения интуиции информация должна иметь некий «смысл», принести пользу, она должна обладать «ценностью» (кое-кто считает, что информация вообще является главной ценностью в нашем мире). Информация должна зависеть от цели, от имеющихся средств ее достижения. Интуитивная информация подразумевает также возможность существования дезинформации (имеет знак).

Таким образом, строго формальные современные понятия количества информации не соответствуют интуитивным понятиям об информации, что, в общем-то, никак важность этих (формальных) понятий не умаляет. Тем не менее потребность в разрешении этого парадокса явно ощущается.

В ряде работ [5, 6] эта проблема решается за счет расширения круга идей и определения дополнительных понятий.

Здесь мы обсудим другую точку зрения, в соответствии с которой все необходимые идеи и понятия присутствуют уже около века в теории статистического оценивания Фишера [7, 8]. По сути дела, необходима только некоторая специальная интерпретация. Это связано с тем, что, по нашему мнению, теория Фишера является очень глубокой и фундаментальной теорией информации. Однако по историческим причинам она фрагментирована по огромному количеству статей и монографий и в явном виде (как единая глобальная теория информации) не воспринимается и не формулируется. Безусловно, есть работы [9–12], в которых некоторые элементы теории Фишера (как правило, информация Фишера) включены в общую физическую картину мира в такой степени, что с ее использованием выводятся фундаментальные уравнения физики (например, уравнение Шредингера). Однако, несмотря на многочисленные интересные идеи и находки, этот подход подвергается критике (в некоторых случаях вполне обоснованной) и пока воспринимается как опасно близкий к границе, за которой начинается маргинальность. Впрочем, по мере развития информационных технологий все больше людей начинают воспринимать информацию как нечто глобальное и универсальное, поэтому настороженность к подходам [9–12] неизбежно будет снижаться. Возможные пределы эволюции идей в этом направлении можно оценить по очень любопытным работам [13, 14].

С точки зрения теории Фишера многие странности современной теории информации в значительной степени снимаются за счет существенного расширения идей и инструментария, при том что смысл основных понятий (например, информации Шеннона) не изменяется. В рамках теории Фишера для семейства плотностей распределений вероятности  $\rho(u, \theta)$ , где  $u \in R^m$  – случайная переменная,  $\theta \in R^n$  – параметр (оцениваемая величина), можно ввести следующие объекты:

- ценная информация

$$\nabla \varepsilon = \frac{\partial \ln \rho(x, \theta)}{\partial \theta_i}, \quad (2)$$

- информационная матрица Фишера

$$F_{ij} = \int \frac{-\partial \ln \rho(x, \theta)}{\partial \theta_i} \cdot \frac{-\partial \ln \rho}{\partial \theta_j} \rho du, \quad (3)$$

- информация Шеннона – Больцмана

$$I_{Sh} = \log_2 \det(F), \quad (4)$$

- информация Фишера

$$I_F = \text{trace}(F). \quad (5)$$

Ниже мы вкратце опишем их основные свойства и связи с информацией (в интуитивном понимании) и когнитивными процессами.

## Ценная информация

Векторная компонента в теории Фишера (градиент плотности вероятности) указывает на положение точки максимума плотности вероятности в пространстве параметров. С использованием этой информации (методом градиентного спуска  $\theta_i^{n+1} = \theta_i^n + \tau \nabla \epsilon_i$  или итерации Фишера  $\theta_i = F_{ij}^{-1} \nabla \epsilon_j$ ) можно найти наиболее вероятный набор параметров, описывающих наблюдения.

Мы обозначим этот градиент термином *ценная информация*, интерпретируя его как знание того, какое воздействие на управляющие параметры выбрать для достижения цели при данном состоянии системы (рецепт) и с какой точностью цель будет достигнута (об этом можно судить по модулю  $\|\nabla \epsilon\|$ ).

На наш взгляд, рассматриваемая *ценная информация* соответствует формализации понятий *полезная информация* [6], *ценность информации* [5].

Ценная информация вплотную связана с сопряженными уравнениями [15, 16]. Возникновение и перенос векторной «ценной информации» описываются сопряженными уравнениями. Эта идея восходит к работам Г.И. Марчука, который сопряженные параметры обозначал как *функцию ценности информации* [17].

Здесь мы обсуждаем задачи в статистической постановке, однако очень похожий формализм существует и в детерминированной постановке при решении обратных задач в вариационной постановке [16].

## Информационная матрица Фишера

Тензорная компонента в теории Фишера – информационная матрица Фишера – это обратная ковариационная матрица погрешности результата оценивания параметров, грубо говоря, некий «эллипсоид рассеивания», задающий неопределенность достижения цели.

Информационная матрица Фишера задает метрику в пространстве плотностей распределений и тесно связана с мерой Кульбака – Лейблера (кросс-энтропией).

Строго говоря, ценная информация  $\nabla \epsilon$  дает точное направление на цель только в плоском пространстве (если  $F = E$ ). Однако итерации типа наискорейшего спуска в конечном итоге приводят к цели и в этом случае. При обучении нейросетей (и детерминированных и байесовских) используется натуральный градиент (natural gradient) [18]  $\nabla \epsilon_N = F^{-1} \nabla \epsilon$ . Его применение соответствует наискорейшему спуску в метрике Фишера и представляется более эффективным в случае нелинейных задач.

Информационная матрица Фишера зависит от выбора множества параметров  $\theta$ , в частности, при обучении нейросетей и их работе используются матрицы Фишера, различающиеся как размерностью, так и смыслом. Численный расчет матрицы

Фишера может быть выполнен с помощью решения сопряженных уравнений второго порядка [19].

## Связь информации Шеннона – Больцмана и информационной матрицы Фишера

Описать свойства и область применения информации Шеннона – Больцмана совершенно непосильная задача, поэтому здесь мы упомянем только ее связь с теорией Фишера.

В случае нормального распределения детерминант матрицы Фишера связан с количеством информации Шеннона [20] следующим соотношением (с точностью до констант):

$$I_{Sh} = \text{Log}_2 \det(F). \quad (6)$$

Таким образом, информация Шеннона является логарифмом некоторого объема в пространстве параметров, определяемого матрицей Фишера.

Для изотропных равновесных систем (например, термодинамических) вся информационная структура, описываемая теорией Фишера, сводится к информации Шеннона – Больцмана, так как в этих условиях ценная информация равна нулю (из-за равновесности), а гиперэллипсоид (матрица Фишера) является гиперсферой (вследствие изотропности), поэтому полностью описывается своим объемом.

## Информация Фишера

След информационной матрицы обычно обозначается как «информация Фишера» (*Fisher information, the information capacity* [9]) и имеет вид  $I_F = \text{trace}(F)$ . В ряде работ [9, 21] она используется в качестве инструмента для выведения уравнений физики, при этом ищется экстремум количества информации Фишера на решении уравнения типа Гамильтона – Якоби. В частности, так получаются уравнения Шредингера в форме Маделунга [21]. Для лагранжиана

$$L = \int \left( \rho \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\rho}{2m} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + U(\rho) \right) dx dt + I_F, \quad (7)$$

$$I_F = 4 \int \left( \frac{\partial \rho^{1/2}}{\partial x} \right)^2 dx dt, \quad (8)$$

условия стационарности имеют вид

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{m} \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \frac{\partial S}{\partial x} \right) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{1}{2m} \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)^2 + U - \int \rho^{-1/2} \nabla^2 (\rho^{1/2}) = 0. \quad (10)$$

Эти уравнения (Маделунга) связаны с уравнением Шредингера преобразованием Маделунга

$$\psi(t, x) = \rho(t, x)^{1/2} e^{iS(t, x)/\hbar}. \quad (11)$$

Здесь к классическому уравнению типа Гамильтона – Якоби добавлена информация Фишера (8). В результате получен гидродинамический аналог уравнения Шредингера. Квантово-механические особенности этой системы связаны с нелокальным боровским давлением (последний член в (10)).



Такое неожиданное применение информации Фишера послужило стимулом к большому количеству работ, в которых информация Фишера используется без излишних комплексов: например, как основа построения физического мира [9] или основа «квантового разума» [22].

В качестве более приземленного примера можно привести широко известный фильтр Калмана, который определяет точку на траектории с эллипсоидом рассеяния и алгоритмически основан на поиске экстремума именно количества информации Фишера (для ковариационной матрицы ошибки прогноза) по отношению к матрице коэффициента усиления Калмана [23].

Если геометрический смысл информации Шеннона достаточно прозрачен (объем некоего гиперэллипсоида в пространстве параметров), то геометрический смысл информации Фишера не столь очевиден. Некоторый свет может пролить следующее выражение:

$$\det(I_n + hF) = 1 + h \cdot \text{tr}(F) + O(h^2). \quad (12)$$

След  $F$  (информация Фишера) дает сведения о вариации единичного объема при малом возмущении вдоль матрицы Фишера  $I_n + hF$ .

### Информация Фишера в байесовских нейросетях и квантовые эффекты

В качестве мостика, связывающего теорию Фишера и когнитивные процессы, мы рассмотрим нейросети байесовского типа. В этих нейросетях вместо весовых коэффициентов нейросети  $w_{ij}$  и величин сдвига  $b_i$  мы имеем дело с некоторыми плотностями распределения  $p(w)$ . Соответственно, в процессе обучения мы получаем вероятности  $p(w|D)$ , где  $D$  – обучающие данные. Соответственно, обученная сеть вместо результата  $y(x)$  дает распределение  $p(y|x, D)$ . При обучении нейросетей такого типа широко используется естественный градиент (natural gradient) [18], использующий матрицу Фишера. При этом параметры вероятностной модели изменяются как

$$\theta^{n+1} = \theta^n + F^{-1} \nabla \epsilon. \quad (13)$$

Соответственно, изменение плотности вероятности можно описать с помощью уравнения типа Перрона – Фробениуса:

$$\rho^{n+1}(\theta) = L \cdot \rho^n(\theta). \quad (14)$$

Это уравнение описывает некий пропагатор, который при малом шаге итерации соответствует шагу численной аппроксимации уравнения переноса плотности вероятности (уравнения типа Колмогорова или, в более общем случае, типа Маделунга). В частности, в некоторых случаях эволюцию байесовской нейросети при обучении можно описать [13, 14] лагранжианом, содержащим информацию Фишера:

$$S = \int dt dq p \left( -4D \frac{\partial^2}{\partial q_k^2} + \gamma \frac{\partial^2}{\partial q_k^2} F + \mu \frac{\partial F}{\partial t} + \mu \gamma \left( \frac{\partial F}{\partial q_k} \right)^2 + \mu V \right). \quad (15)$$

Стационарность этого функционала приводит к уравнениям квантовой гидродинамики типа Маделунга

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial q_k} (u_k \rho) + \frac{\gamma}{\mu} \frac{\partial^2 \rho}{\partial q_k^2} \quad (16)$$

и

$$\frac{\partial u_j}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_j}{\partial q_k} + \frac{\gamma}{\mu} \frac{\partial^2 u_j}{\partial q_k^2} = -2\gamma \frac{\partial}{\partial q_j} \left( V - \frac{4D}{\mu \sqrt{\rho}} \frac{\partial^2 \sqrt{\rho}}{\partial q_k^2} \right). \quad (17)$$

Последний член в правой части соответствует квантовому (бомовскому давлению). Система (16), (17) отличается от обычных уравнений Маделунга (9), (10) наличием диффузии.

Таким образом, при некоторых условиях динамика обучения байесовской сети может описываться уравнениями квантово-механического типа. Это может приводить к некоторой эффективной (emergent) квантовости [13], не основанной на физической квантовости.

Обсуждение возможности физической квантовости когнитивных процессов продолжается достаточно давно [22, 24, 25]. Вклад информации Фишера в структуру квантово-механических уравнений в некоторых работах [22, 24] интерпретируется как существование отдельной «активной» информации (active information), связанной с «квантовой потенциальной энергией» (quantum potential energy). В рамках этой структуры «квантовое сознание» может воздействовать на процессы в нейронах без нарушения законов сохранения.

Возможности физической реализации «квантового сознания» обсуждаются в [25], где найден перспективный механизм, основанный на спинах ядер. Имеются и определенные успехи в экспериментальном обнаружении квантовых эффектов в биологических объектах (например, квантовый компас [26]).

Несмотря на это, на данный момент условия внутри биологических объектов представляются слишком тяжелыми (грубо говоря, слишком жарко) для существования полноценного (на физическом уровне) квантового сознания. С этой точки зрения построение квантовых элементов сознания на основе микротрубочек [27] вызывает серьезные сомнения.

В то же время для эффективной квантовости [13] физических ограничений быть не должно, так как она определяется макроскопическими (классическими) свойствами нейросети. Если перейти к компьютерному сленгу, речь идет об эмуляции квантового компьютера классическим. Современные успехи [28] в развитии и применении тензорных разложений дают определенную надежду на реализуемость такого подхода.

Возможность существования эффективной квантовости может проливать свет на некоторые квантовые эффекты, наблюдаемые в социальных [29] и в когнитивных процессах [30, 31, 32]. В частности, нельзя исключить возможности связать такие когнитивные эффекты, как интуиция или озарение, с проявлениями эффективной квантово-

сти сознания (такими как запутанность и туннелирование).

### Заключение

Теория Фишера обладает огромной мощностью и гибкостью в описании информационных процессов, что создает интересные перспективы ее применения к описанию когнитивных процессов.

В рамках обычных подходов к байесовским нейросетям градиент функции правдоподобия позволяет определить такое понятие, как ценная информация, что позволяет формализовать такие интуитивные свойства информации, как смысл и ценность.

Некоторые (впрочем, достаточно экзотические) варианты байесовских нейросетей описываются уравнениями типа Маделунга с эффективной квантовостью, что представляется перспективным с точки зрения реализации некоторого «эффективного квантового сознания».

### Литература

1. *Hartley R.V.L.* Transmission of Information // International Congress of Telegraphy and Telephony, Lake Como, Italy, 1927.
2. *Shannon C.E.* A Mathematical Theory of Communication // The Bell System Technical Journal. 1948. V. 27. P. 379–423, 623–656.
3. *Shannon C.E., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press, 1949.
4. *Колмогоров А.Н.* Три подхода к определению понятия «количество информации» // Проблемы передачи информации. 1965. Т. 1, вып. 1. С. 3–11.
5. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М.: УРСС, 2004. 287 с.
6. *Бонгард М.М.* Проблема узнавания. М.: Наука, 1967. 319 с.
7. *Fisher R.A.* Theory of statistic estimation // Proc. Cambridge Phil. Soc. 1925. V. 25. P. 700–725.
8. *Fisher R.A.* On the mathematical foundations of theoretical statistics // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 1922. V. (A) 222. P. 309–368.
9. *Frieden B.R.* Science from Fisher Information. A Unification. Cambridge Univ. press, 2004.
10. *Frieden B.R., Gatenby R.A. (eds).* Exploratory Data Analysis Using Fisher Information. London: Springer-Verlag, 2007.
11. *Vanchurin V.* Covariant Information Theory and Emergent Gravity // Int. J. Mod. Phys. 2018. V. A 33, № 34. Art. 1845019.
12. *Встовский Г.В.* Элементы информационной физики. М.: МГИУ, 2002.
13. *Katsnelson M.I., Vanchurin V.* Emergent Quantumness in Neural Networks // arXiv:2012.05082v1. 2020.
14. *Vanchurin V.* The world as a neural network // Entropy. 2020. V. 22. P. 1210.
15. *Алексеев А.К.* О ценной информации в задачах усвоения данных наблюдений // Труды IV Всерос. конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2015». Н. Новгород, 2015. С. 16–18.
16. *Алексеев А.К., Бондарев А.Е.* О ценной информации в обратных задачах и ее визуализации // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2016. № 34.
17. *Марчук Г.И.* Сопряженные уравнения и анализ сложных систем. М.: Наука, 1992. 336 с.
18. *Amari Shun-ichi.* Natural Gradient Works Efficiently in Learning // Neural Computation. 1998. V. 10. P. 251–276.
19. *Alekseev A.K., Navon I.M.* On Estimation of Temperature Uncertainty Using the Second Order Adjoint Problem // Int. J. Comput. Fluid Dynamics. 2002. V. 16 (2). P. 113–117.
20. *Singh K., Sandu A., Jardak M., Bowman K.W., Lee M.* A practical method to estimate information content in the context of 4D-Var data assimilation // SIAM/ASA Journal of Uncertainty Quantification. 2013. V. 1. P. 106–138.
21. *Reginatto M.* Hydrodynamical formulation of quantum mechanics, Kahler structure, and Fisher information // arXiv:quant-ph/9909065v1. 1999.
22. *Bohm D.* A new theory of the relationship of mind and matter // Philosophical Psychology. 1990. V. 3. P. 271–286.
23. *Thacker N.A., Lacey A.J.* Tutorial: The Likelihood Interpretation of the Kalman Filter // TINA Memos: Advanced Applied Statistics 1996. № 2(1). P. 1–11.
24. *Hiley B.J., Pylikkanen P.* Can Mind Affect Matter Via Active Information? // Mind & Matter. 2005. V. 3 (2). P. 7–27.
25. *Fisher M.P. A.* Quantum cognition: The possibility of processing with nuclear spins in the brain // Ann. Phys. 2015. V. 362. P. 593–602.
26. *Ritz T., Thalau P., Phillips J.B., Wiltschko R., Wiltschko W.* Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass // Nature. 2004. V. 429 (6988). P. 177–180.
27. *Hameroff S.R., Penrose R.* Conscious events as orchestrated spacetime selections // J. Consciousness Studies. 1996. V. 3, № 1. P. 36–53.
28. *Oseledets I.V.* Tensor-train decomposition // SIAM J. Sci. Comput. 2011. V. 33. P. 2295–2317.
29. *Шустова О.А.* Квантовое моделирование нелинейной динамики цен на акции: Бомовский подход // Теор. и матем. физика. 2007. Т. 152, № 2.
30. *Хренников А.Ю.* Введение в квантовую теорию информации. Физматлит, 2008.
31. *Khrennikov A.* On the Physical Basis of Theory of “Mental Waves” // NeuroQuantology. 2010. V. 8, iss. 4. Supplement Issue 1. P. 71–80.
32. *Conte E. et al.* Mental states follow quantum mechanics during perception and cognition of ambiguous figures // Open Systems & Information Dynamics. 2009. V. 16(1). P. 85–100.

# Адаптация языка к социальным изменениям в обществе: культурные параллели Россия – Германия

Л.А. Аверкина<sup>1</sup>, Б. Лахгайн<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова  
e-mail: larissa.averkina@mail.ru

<sup>2</sup>Университет Дуйсбург-Эссен, Институт дополнительных исследований, Германия  
e-mail: lachhein@deutsch-russische-begegnung.de

Современный стиль жизни динамичен; современные люди как никогда раньше имеют возможность перемещаться по миру, движимые самыми разными мотивами – в поисках работы, нового опыта, лучшей жизни, в поисках возможности самореализации в другой культурной среде и т.д. В постоянном движении вместе с ними находятся соответственно их языки, нормы, ценности, мировоззрения. Глобализация, миграция, компьютеризация, дигитализация вывели культурное взаимодействие и общение на новый уровень и запустили различные новые механизмы развития общества и языка. В то время как в некоторых государствах, таких как Россия, США, Франция, реакцией на глобализацию является укрепление национальной идентичности, Германия идет по пути, *общему* для всей Европы. В ЕС это в первую очередь касается языка.

*Языковая политика Европейского Союза* своей приоритетной задачей ставит необходимость создания условий для мобильности, межкультурного взаимопонимания и взаимодействия народов Европы; важным фактором для этого является знание языков (многоязычие). Концепт «единого европейского образовательного пространства» предусматривает, что к 2025 году каждый европеец должен говорить, кроме своего родного языка, еще как минимум на двух иностранных [1]. В результате владение несколькими языками оказывает воздействие как на иностранные языки индивида, так и на его родной язык, существенно меняя его.

В Германии, например, говорят о новом варианте языка – денглише (Denglisch): Deutsch и Englisch. Английский существенно изменил словарный состав немецкого языка, его синтаксис и словообразование как в научных, официальных текстах, так и в обиходном общении: *Texte werden downgeloadet* вместо „*heruntergeladen*“ (загружать тексты); *Angela Merkel wurde Bundeskanzlerin in 2005* вместо *im Jahre 2005* (изменена синтаксическая структура).

Немецкий обиходный язык в современной Германии активно смешивается также с турецким, арабским, русским под влиянием эмигрантов из этих стран, образуя различные жаргоны и сленги. Эти явления в языке можно назвать *естественным процессом*, они являются результатом межкультурной коммуникации, изменения в языке стали результатом межнационального общения, можно сказать «*вышли из народа*».

Наряду с этими явлениями, с естественным процессом развития языка, следует отметить государственную «*языковую политику*». Этому термину специалистами дано много разных дефиниций. Электронный словарь (Online-Wörterbuch *Wortbedeutung.info*) дает следующее определение: «*Языковая политика* – это влияние на язык и на сознание говорящего на этом языке с целью использования его [языка] в определенном, нужном направлении» [2]. В этой связи существует несколько языковых концептов.

*Первый концепт* языковой политики связан с *гендером*. Цитата из Дудена (Duden): «Гендер – это социальная категория, относящаяся к половой идентичности человека» [3]. Понимание „gender“ как социального рода начало разрабатываться, как известно, в 70-е годы прошлого века британскими социологами, в дальнейшем оно активно внедрялось ООН и Европейской Комиссией в различные документы Европейского Союза. В Германии, например, в настоящее время существует более 200 кафедр, которые занимаются проблемами гендера. Исследования посвящены изучению *равенства полов*, а также тому, что *гендерно равноправный* язык наряду с *мужчиной* и *женщиной* должен признавать также наличие *других полов*, в обозначении которых в немецкоязычном пространстве пока нет четких определений, нет *единого* обозначения «*других полов*». Исследователями этой проблемы предлагаются различные средства (маркеры) для обозначения гендера, например орфографические средства: 1) *соединительное заглавное I (das Binnen-I)*; 2) *Косая черта / (Schrägstrich)*; 3) *подчеркивание внизу (Gender-Gap)*; 4) *звездочка \* (Gender-Stern)*. Рассмотрим, как функционируют эти приемы.

## 1. Заглавное I (Das Binnen-I)

Первая буква в суффиксе существительного женского рода (*-in*) пишется с заглавной буквой *I*. Написанное таким образом слово эксплицитно указывает на мужчин и женщин: *StudentIn*; *ArbeitnehmerInnenschutz*; *ArchitektIn*, *RechtsanwältIn*. Однако могут быть некоторые смысловые курьезы, например, если предложение «*99 Studenten und eine Studentin besuchen die Vorlesung*» написать в соответствии с новыми правилами с заглавной *I*, получится: «*100 StudentInnen besuchen die Vorlesung*». В содержании теряются или искажаются определенные данные.

## 2. Косая черта / (Schrägstrich)

При помощи *косой черты* / передаются оба значения существительного: мужского и женского

рода. *Ein/e Student/in wird geprüft. Dieser/diese Professor/in arbeitet wissenschaftlich.*

При этом оба случая – **заглавное I** и **косая черта /** – являются сокращенной формой обозначения мужского и женского рода, но они не устраняют гендерную дискриминацию, так как называют только два пола, игнорируя, таким образом, наличие других полов.

**3. Подчеркивание внизу \_ (Gender-Gap) и звездочка \* (Gender-Stern)** в отличие от первых двух приемов являются в письменной речи маркерами для возможных других полов, кроме мужского и женского. В устной речи эти маркеры тоже находят выражения: они передаются задержкой звука в этом месте, а также паралингвистически – движением руки со стороны внутрь во время короткой паузы при произношении мужской и женской формы слова:

*Sehr geehrte\_r Student\_innen und Dozent\_innen.*

*Ein\*e gut ausgebildete\*r Jurist\*in wird gesucht.*

*Der\*die Student\*in ist fleißig.*

*Die Leser\*innen sind im Raum 10.*

**Языковая политика Европейского Союза** рекомендует также *использование в речи гендерно-нейтральных формулировок и обозначений всех гендерных видов.*

#### **4. Использование гендерно-нейтральных формулировок**

В речи можно использовать обороты, которые нейтральны относительно гендера – инфинитивные и пассивные формы, деепричастные обороты, например: *Die Student\*innen werden aufgefordert, die bestellten Bücher umgehend abzuholen.* – *Bitte die bestellten Bücher umgehend abholen.* Вместо того чтобы называть «Студенты и студентки», использовать побудительное предложение «*Заберите заказанные книги!*»

*Die Studenten/StudentInnen/Student\*innen erhalten das Stipendium jeweils am Monatsanfang.* – *Das Stipendium wird am Monatsanfang ausgezahlt.* В данном предложении используется пассивная конструкция вместо обозначения лиц мужского и женского пола.

*Lehrende, Studierende, Reisende, Radfahrende, Fahrzeugführende.* – Использование причастий также решает проблему обозначения полов: *учащиеся, путешествующие* и т.д.

#### **5. Использование в речи обозначений всех гендерных видов**

Для обозначения всех гендерных видов предлагается использовать форму слова в мужском роде, к которой добавляется обозначение всех родов: *мужской род, женский род, другой род – männlich, weiblich, divers (m, w, d).* В официальном объявлении-приглашении на работу, например, указываются все гендерные формы: *Gesucht wird Controller (m, w, d).* – *На работу контролером приглашаются желающие всех родов (мужского, женского и других).*

Как видно из приведенных данных, проблема гендера активно дискутируется в обществе как в теоретическом плане, так и в практической реализации полученных результатов. Данным вопросом

занимался также **Совет по орфографии немецкого языка в Мангейме**, в состав которого входят представители Федеративной Республики Германии, Австрии, немецкоязычных кантонов Швейцарии, Княжества Лихтенштейн, автономной провинции Больцано в Южном Тироле и немецкоязычной общины в Бельгии. В своей резолюции от 16.11.2018 г. Совет констатировал, что «общественный дискурс по вопросу о том, как можно на практике реально и подобающим образом обозначать наряду с мужским и женским полом третий или принадлежность к другим различным полам, является дискуссионным. Однако те лица, которые не могут отнести себя ни к мужскому, ни к женскому полу, имеют право на соответствующее обозначение в языке» [4].

В то время, когда немецкоязычное пространство продолжает искать приемлемый вариант для справедливого решения гендерной проблемы в языке, Швеция для обозначения лица, которое не относит себя ни к мужскому, ни к женскому полу, искусственно создала местоимение „**Hen**“, которое существует параллельно с личным местоимением „**han**“ (*er*) и „**hon**“ (*sie*). Местоимение „**Hen**“ упрощает таким образом шведский язык как в устной, так и в письменной речи и в то же время подчеркивает, что коммуникант оперирует не только категориями «мужской» и «женский», но акцептирует также категорию «других полов». Постепенно местоимение „**Hen**“ стало активно использоваться в текстах массовой информации, в официальных документах и в судопроизводстве. В 2015 году это слово было зафиксировано в стандартном словаре шведского языка „Svenska Akademiens ordlista“ [5].

В Германии использование гендерно-справедливого языка на основании решений Европейской Комиссии по правам человека рекомендовано официальным учреждениям и ведомствам, а также вузам. Студенты в своих научно-исследовательских работах должны учитывать этот факт, а также употреблять нейтральные в гендерном отношении формулировки; в противном случае работы не выдерживают контроль и не допускаются к защите.

Несмотря на то что гендерный концепт стал официальной реальностью, в обществе он активно критикуется. Критика направлена в первую очередь на то, что *данный концепт разработан специалистами, теоретиками, которые не учитывали проблемы использования его в реальной жизни.*

**Второй концепт** языковой политики связан с **политкорректностью (Political Correctness): замена в языке дискриминирующих слов.**

Федеральная служба по формированию политкорректности дает следующее разъяснение: «Политкорректность – это такое отношение, которое не допускает выражения или действия, дискриминирующее человека по его этническому происхождению, по половому признаку, по принадлежности к какому-либо особому социуму, физической или умственной неполноценности, сексуальной ориентации. В связи с этим некоторые исторически сло-

жившиеся отдельные слова и выражения должны быть признаны недопустимыми и заменены альтернативными лексическими единицами и фигурами речи. Политически некорректное слово задевает чувство отдельного индивида, независимо от того, насколько сильно это его обижает и травмирует. Политкорректность языка, однако, нередко ведет к неясностям, противоречиям и новым проблемам взаимопонимания» [6].

Несколько примеров, которые отражают общественные процессы в Германии в аспекте политкорректности. В соответствии с требованием соблюдения равенства полов *Rednerpult* – трибуна (суффикс *-er* мужского рода) теперь нужно называть *Redepult* (трибуна), где в форме слова суффикс *-er* отсутствует. Вместо *Krankenschwester* (медсестра) следует использовать *Pflegekraft* (персонал по уходу за больными). *Иностранцев* (*Ausländer*) теперь следует называть *люди с миграционным прошлым* (*Menschen mit Migrationshintergrund*) или *лица с миграционной историей* (*Menschen mit Zuwanderungsgeschichte*). Чтобы повысить значимость некоторых социально не престижных профессий, им дается другое название, так *уборщицу* (*Putzfrau*) называют *женщина, поддерживающая порядок в помещениях* (*Raumpflegerin*); вместо *уборщик туалетов* (*Toilettenmann*) употребляется *менеджер туалетных комнат* (*facility manager*). Запрещается использование лексики, дискриминирующей человека по половому признаку: *слабый пол, сильный пол* (*das schwache Geschlecht, das starke Geschlecht*). Вместо *физически* или *умственно неполноценные* (*körperlich oder geistig Behinderte*) теперь говорят *люди с другими потребностями* (*Mensch mit anderen Bedürfnissen*). Языковой дискриминацией считается слово *калека* (*Krüppel*). Взамен дискриминирующих слов и выражений политкорректность требует использование нейтральных: вместо *женская консультация* (*Mütterberatung*) – *консультация родителей* (*Elternberatung*); вместо *Mannschaft* (команда) – *Team, Gruppe*, потому что в слове *Mannschaft* семантическим корнем является компонент «мужчина» (*Mann*). Нельзя употреблять в речи некоторые ранее бывшие нейтральными выражения, например: *необразованные люди* (*funktionale Analphabetinnen und Analphabeten*), их надо называть *мало или недостаточно начитанные взрослые* (*gering literarisierte Erwachsene*). Нельзя использовать принятое раньше обращение *Familie Franz Muster*, нужно *Familie Anna und Franz Muster*.

Рассмотрим описанные выше явления с позиций перевода с немецкого языка на русский: насколько возможно в переводе на русский язык отразить новые языковые явления, зафиксированные в немецкой культуре.

Первые два приема для обозначения гендера в письменном тексте – *соединительное заглавное I* (*das Binnen-I*) и *косая черта* / (*Schrägstrich*) – в русском языке использовать невозможно в связи с различиями в слово- и формообразовании. Некоторые существительные такие, как *ученик – ученица, студент – студентка* и многие другие можно передать в формах мужского и женского рода.

Однако многие существительные женского рода, образованные от мужского, имеют другую, как правило, негативную коннотацию, например: *доктор – докторша, врач – врачиха, профессор – профессорша*. Чтобы передать гендерную специфику можно, например, сказать «*профессор Вера Ивановна Попова*» и т.д.

Третий прием – *подчеркивание внизу* – (*Gender-Gap*) и *звездочка* \* (*Gender-Stern*) – как маркеры обозначения возможных других полов не зафиксированы ни в орфографии, ни в невербальных кодах русского языка. Передавать их следует средствами культуры русского языка.

Четвертый прием – *использование гендерно нейтральных формулировок* – возможен также и в русском языке. Так, вместо *ученик* и *ученица* можно использовать *учащиеся*; вместо *студент* и *студентка* – *учащиеся вуза*; вместо *путешественник* и *путешественница* – *путешествующие* (другой частью речи) и т.д.

И пятый прием – *использование в речи обозначений всех гендерных видов: мужской род, женский род, другой род* (*männlich, weiblich, divers (m, w, d)*) – будет переводиться также в рамках культуры русского языка, например: *На работу приглашаются представители всех полов*.

1. Несмотря на то что в Германии *гендерный концепт* стал официальной реальностью, в обществе он активно критикуется. Критика направлена в первую очередь на то, что данный концепт разработан специалистами, теоретиками, которые не учитывали проблемы использования его в реальной жизни. Репрезентативный представительный опрос, проведенный в марте 2019 года по инициативе Общества немецкого языка (насчитывает 36000 членов во всем мире) на тему «Гендер», выявил, что подавляющее большинство опрошенных (74,6 %) проявили незначительный интерес к новым предписанным сверху языковым и социальным нормам. В обиходной жизни «гендерно равноправный язык», то есть язык с разработанными и предлагаемыми «сверху» новыми гендерными нормами, не используют 90 % респондентов, и в производственной сфере это составляет 74,6 % [7].

2. Научно-исследовательский проект «Индивидуализация в современном обществе», реализованный в университете Фрайбург в 2018 году кафедрой общественных наук, обработав результаты исследования, пришел к следующим выводам: «Традиционные ценности исчезают, на их место приходят новые нормы «политкорректности». Они становятся главными, не подлежащими обсуждению и само собой разумеющимися. В результате этого разрушается ощущение безопасности и уверенности, что может привести к агрессии и защитной реакции со стороны некоторых граждан и гражданок общества» [8].

3. Относительно решения проблемы гендера в правилах русского языка никаких официальных документов и предписаний пока не существует. Однако эту реальность немецкого языка нельзя

игнорировать особенно при переводе *официальных документов* ООН, Европейского Союза, документации юридических служб и судопроизводства. При переводе *неофициальных текстов* следует остановиться на языковых и общественных нормах русской культуры.

**4. Язык является зеркалом, отражающим все социальные изменения в обществе.** Взаимовлияние языков друг на друга, появление новых денотатов, ценностных маркеров является естественным процессом. **Если язык не меняется вместе с социальными изменениями общества, то этот язык не может обслуживать современное общество.**

#### Литература

1. Europäisches Parlament: Sprachenpolitik. URL: [https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU\\_3.6.6.pdf](https://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU_3.6.6.pdf) COM(2017) 673.
2. Online-Wörterbuch Wortbedeutung.info. URL: <https://www.wortbedeutung.info/Sprachpolitik/>.
3. Duden / Bibliographisches Institut GmbH Dudenverlag. 27. Ausgabe. Berlin, 2017.
4. <https://www.tagesspiegel.de/wissen/rat-fuer-deutsche-rechtschreibung-keine-empfehlung-zum-gendersternchen/23643900.html>.
5. <https://www.spiegel.de/lebenundlernen/schule/schule-schweden-neues-geschlechtsneutrales-personalpronomen-a-1025479.html>.
6. <http://www.bpb.de/politik/grundfragen/sprache-und-politik/42730/politische-korrektheit?p=all>.
7. Sprachnachrichten. Nr. 82. II/2019. S. 2.
8. Beck U., / Beck-Gernsheim E. Individualisierung in modernen Gesellschaften – Perspektiven und Kontroversen einer subjektorientierten Soziologie // Riskante Freiheiten / U. Beck / E. Beck-Gernsheim (Hg.). Frankfurt/Main: Suhrkamp (1994). S. 10–39.

# Координация актуализации составляющих психологических структур

И.О. Александров<sup>1</sup>, Н.Е. Максимова<sup>1</sup>, Д.С. Турубар<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУН Институт психологии РАН, Москва, email: almax2000@inbox.ru

<sup>2</sup>Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, email: dturubar@gmail.com

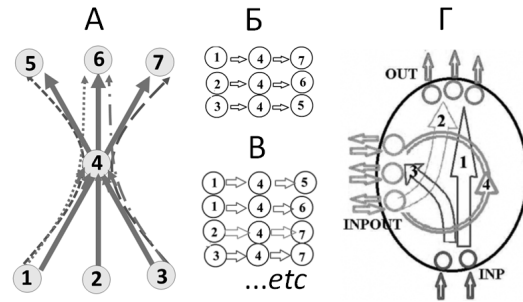
Психологические структуры (ПС) формируются как совокупность информационных моделей взаимодействия индивида с предметными и социальными составляющими институционализированных предметных областей [9–11]. Каждая информационная модель цикла взаимодействия фиксируется в специализации определенной группы нейронов и представляет собой компонент ПС. Возможность избирательной актуализации компонентов ПС при взаимодействии индивида с институционализированной предметной областью достигается за счет взаимодействий между компонентами. Информационные модели различных типов взаимодействий компонентов ПС фиксируются в группах специализированных нейронов как дополнительные специализации [1, гл. 10; 2; 6] и формируют группы компонентов ПС, представляющие стратегии, связанные группы стратегий (метастратегии) и группы компонентов, топология которых непланарна [3, 4, 10, 11].

Целостность сложной организации ПС следует из общего происхождения ее составляющих (например, метастратегий и непланарных групп компонентов). Они дифференцируются из единого набора протокомпонентов ПС, представленных преспециализированными нейронами [1], а затем самовоспроизводятся с вариациями в процессах ауторепликации. На ауторепликационный характер порождения ПС в целом и каждой из ее составляющих указывает высокая степень сходства организации ПС индивидов на различных этапах формирования компетенции в определенной предметной области, а также в различных предметных областях [10, 11].

Онтологически определенная организация ПС может быть описана на основе формализма семантической сети, вершины которой представляют компоненты ПС, а ребра – отношения между компонентами. Семантическая сеть, описывающая ПС, неоднородна, поскольку на множестве компонентов реализуются отношения нескольких типов, которые образуют различные варианты подмножеств компонентов ПС [1, 13].

Отношения диахронического (пропозиционального) типа (двухместные отношения следования) представлены в семантической сети дугами. Отношения следования организуют последовательности актуализации компонентов: отношения строгого порядка связывают компоненты ПС в линейные стратегии, а отношения, образующие петли и циклы, формируют гибкие стратегии (с возможностью перестановок в порядке актуализации компонентов ПС). Группы стратегий, имеющих общие компоненты, образуют особые состав-

ляющие ПС – *метастратегии* (см. рис. 1). Организация маршрутов, определенных на пропозициональной сети, в метастратегии повышает вероятность приближения к целевой ситуации [3].



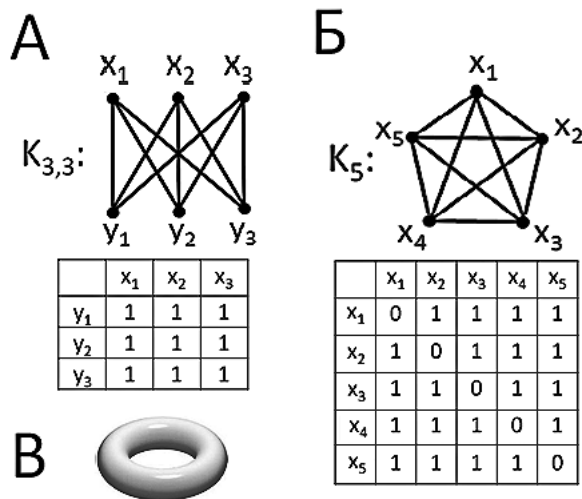
**Рис. 1.** Образование и организация метастратегий:

*А:* Образование метастратегий за счет перекрытия наборов компонентов ПС, образующих стратегии. Кружки с цифрами – компоненты ПС, помеченные номерами; сплошные стрелки – реализованные маршруты, их список дан на *Б*. Штриховые стрелки – нереализованные, но потенциально возможные маршруты, часть их списка дана на *В*.

*Г:* Схема организации метастратегий. Овал обозначает границы метастратегии. Стрелки вне овала – входящие в метастратегию и исходящие из нее дуги. INP – группа «входных» вершин, OUT – «выходных», INPOUT – «входных-выходных» вершин. Стрелки внутри овала обозначают направления маршрутов, связывающих группы вершин, принадлежащих метастратегии, они ведут: 1 – от входных к выходным вершинам (от INP к OUT), 2 – от входных-выходных к выходным вершинам (от INPOUT к OUT), 3 – от входных к входным-выходным вершинам (от INP к INPOUT), 4 – от входных-выходных вершин возвращаются к ним же (от INPOUT к INPOUT)

Отношения синхронического (ассоциативного) типа представлены в сети ребрами, они описываются двухместными неориентированными логическими операторами AND, XOR и IOR, которые определяют возможности или запреты одновременной актуализации подмножеств компонентов ПС [1]. Особая форма организации подмножеств компонентов, связанных синхроническими отношениями AND, XOR и IOR – непланарные фрагменты семантической сети, которые диагностируются по включенности в них торических графов Куратовского: однодольного графа  $K_5$  или двухдольного  $K_{3,3}$  [14, с. 133], см. рис. 2. Эти непланарные фрагменты сети обладают эйлеровыми характеристиками  $\chi = 0$  (торы с одной дыркой) и  $\chi = -2$  (двухдырочные торы). Планарные подмножества семантической сети обладают либо плоской, либо сферической топологией и имеют эйлерову характеристику  $\chi = +2$  (см. [4]).

Можно предположить, что координация нескольких метастратегий, то есть согласование их состава и синхронизация их актуализации обеспечивается перекрытием состава непланарных групп с компонентным составом реализующихся метастратегий, которое образует общую область связности для этих составляющих ПС. Связность как понятие теории множеств характеризует невозможность представить какую-либо структуру «в виде суммы непустых непересекающихся открытых множеств» [12].



**Рис. 2.** Непланарные составляющие психологической структуры:

*А:* Двудольный граф  $K_{3,3}$  и его матричное представление. *Б:* Однодольный граф  $K_5$  и его матричное представление. *В:* Тор, на поверхности которого графы  $K_5$  и  $K_{3,3}$  укладываются без пересечений ребер

**Цель** данной работы состоит в том, чтобы описать варианты соотношения (связности) метастратегий и непланарных групп компонентов ПС.

### Методика

Проанализирована организация метастратегий и непланарных групп компонентов ПС у 65 участников исследования (33 женщины, 32 мужчины в возрасте от 17 до 31 года, медиана – 21,5 года), которые формировали компетенцию в стратегической игре двух партнеров в «Крестики-нолики» на поле  $15 \times 15$ . Каждая пара продолжала игру, пока не совершала 300 ходов (от 11 до 30 игр). Регистрировали координаты ходов на игровом поле. Для каждого участника исследования реконструировали организацию ПС: перечисление компонентов, отношений между ними, групп компонентов, сформированных отношениями различного типа (см. [1]). Для состояния организации ПС, достигнутого за 300 ходов игры, строили описание метастратегии как пересечения маршрутов на ориентированном графе, отображающем отношения следования между компонентами ПС. Для формального выделения непланарных групп компонентов ПС на матрицах смежности изолированных подграфов подмножеств семантической сети, образованных отношениями AND и XOR, опреде-

ляли совпадения с шаблонной матрицей графов  $K_5$  и  $K_{3,3}$  (см. рис. 2, *А* и *Б*). Для оценки связности метастратегий и непланарных групп формировали перечень компонентов ПС, которые одновременно входят в состав метастратегий и непланарных групп, содержащих графы Куратовского  $K_5$  и  $K_{3,3}$ , и определяют их «вершинную связность». Удаление этих вершин суммарного графа метастратегий и/или непланарной группы компонентов делает его несвязным [7, с. 191].

### Результаты

Метастратегии были найдены в ПС у всех участников исследования; у каждого индивида их количество варьировало от 1 до 4,  $med = 2$ . Метастратегии включали от 5 до 66 компонентов (вершин графа),  $med = 45$ , связанных отношениями следования – от 6 до 112 дуг графа,  $med = 45$ .

Непланарные группы компонентов ПС (подмножества семантической сети, содержащие подграф  $K_5$ ), были найдены у 47 участников исследования из 65. Максимальные из этих групп были образованы отношениями AND на восьми компонентах ПС, т.е. они содержали несколько пересекающихся матриц  $K_5$ . Подмножества семантической сети, образованные отношениями XOR и содержащие подграф  $K_{3,3}$ , были найдены у всех участников исследования. Выделенные подмножества могли изменяться по объему от шаблонной матрицы  $3 \times 3$  (6 компонентов ПС) до матрицы смежностей для 60 компонентов, содержащей несколько пересекающихся подматриц  $K_{3,3}$ . Матрицы, описывающие непланарные группы компонентов с включением графа  $K_{3,3}$ , могли иметь сложную конфигурацию (см., например, матрицу TOR-3 на рис. 3, размерности  $5 \times 8$ , образованную 13 компонентами, с 10 нулевыми и 30 ненулевыми значениями смежности). Количество непланарных групп, содержащих  $K_{3,3}$ , в составе ПС индивидов варьировало от 1 до 5.

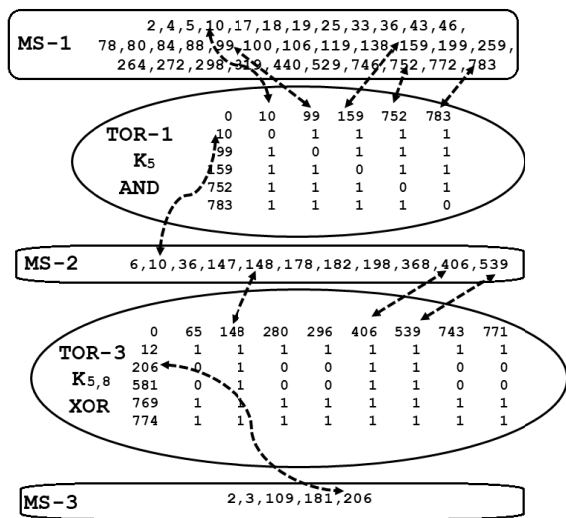
Были выявлены следующие варианты соотношения метастратегий и непланарных групп компонентов ПС:

1. *Все пары метастратегий и непланарных групп не имеют общих компонентов, отображаются несвязными графами* [14]. Несвязность отмечена как для  $K_5$ , так и для  $K_{3,3}$ .

2. *Общие компоненты ПС выделяются для пары метастратегия / непланарная группа.* Пересечение множеств вершин метастратегии и непланарной группы может содержать более одного компонента; для непланарных групп  $K_5$  все компоненты такой группы могут быть включены в состав метастратегии. Для непланарных групп  $K_{3,3}$  максимальный объем множества вершин, общего с метастратегией, ограничен набором компонентов, образующих долю двудольного графа вида  $K_{3,3}$ . Например, для графа этого типа с матрицей  $4 \times 6$  объем набора компонентов, определяющего вершинную связность непланарной группы и метастратегии, может составить 4 или 6, но во всех зафиксированных случаях в набор компонентов,



составляющий «зону связности», входили компоненты только одной доли двудольного графа, включающего  $K_{3,3}$ .



**Рис. 3.** Области вершинной связности метастратегий и непланарных групп компонентов ПС. Схема построена для участника исследования № 81. В его ПС выявлено 3 метастратегии, одна непланарная группа  $K_5$ , пять непланарных групп  $K_{3,3}$ ; на рисунке показана часть этого множества связанных составляющих ПС. Метастратегии показаны как перечисление включенных в них компонентов – в прямоугольных контурах. Неplanарные группы представлены в матричной форме, в овалах. Стрелками помечены компоненты ПС, включенные в состав метастратегий и неplanарных групп. Компоненты неplanарной группы TOR-1 связаны отношениями AND, они образуют однодольный граф  $K_5$ . Компоненты неplanарной группы TOR-3 связаны отношениями XOR, они образуют несколько пересекающихся двудольных графов  $K_{3,3}$ .

3. *Область связности образуют две метастратегии и одна неplanарная группа.* Вариант связности, образованный графом  $K_5$ , показан на рис. 3 (неplanарная группа TOR-1 образует связность с метастратегиями MS-1 и MS-2). В область связности группы TOR-1 и метастратегии MS-1 включен весь объем компонентов, образующих неplanарную группу, связность TOR-1 с метастратегией MS-2 образована одним общим для них компонентом. Пример области связности, образованной двумя метастратегиями (MS-2 и MS-3) и неplanарной группой TOR-3, которая представлена двудольным графом  $K_{5,8}$  и содержит несколько двудольных подграфов  $K_{3,3}$  (в том числе подграф  $K_{3,5}$  (148, 406, 539) × (12, 206, 581, 769, 774)), показан на рис. 3. Заметим, что в область связности TOR-3 и MS-2 целиком входит доля графа  $K_{3,5}$  – (148, 406, 539), а связность TOR-3 и MS-3 определяет только один компонент другой доли того же подграфа  $K_{3,5}$  – (206).

### Обсуждение результатов

Установлено, что между метастратегиями и неplanарными группами компонентов ПС существует несколько вариантов связности. Наиболее сложный вариант связности – пересечение состава

двух метастратегий на компонентах, образующих неplanарную группу. Представляется, что конфигурация области связности может и далее усложняться, например при включении в нее большего количества метастратегий и неplanарных групп или включения в область связности неplanарных групп с эйлеровой характеристикой  $\chi = -2$ , т.е. двойных торов [4].

Компоненты ПС, образующие неplanарные группы, могут входить в пересечение с составом любых метастратегий, поскольку обе эти составляющие ПС могут быть организованы на одних и тех же наборах компонентов. Такая форма связности в теории графов обозначена как «вершинная» [7]. «Реберная» связность между графами, описываемыми метастратегиями и неplanарными группами, не может быть установлена, поскольку ребра этих составляющих ПС отображают качественно разные сущности: диахронические отношения следования, образующие метастратегии, и синхронические отношения AND и XOR, образующие неplanарные группы. Поэтому неplanарная группа, даже если все ее компоненты включены в область связности с метастратегией, сохраняет самостоятельность относительно метастратегии и может через вариации степени актуализации собственных компонентов изменять, модулировать актуализацию компонентов, включенных в метастратегию, причем как в области вершинной связности, так и на всем множестве компонентов метастратегии в целом.

Таким образом, актуализация конкретной неplanарной группы компонентов ПС может согласованно модулировать степень актуализации различных областей двух метастратегий (см. рис. 1, Г и рис. 3), осуществлять координацию их реализации. Неplanарные группы, содержащие графы  $K_5$ , ребра которых представляют отношения AND, по нашему предположению, могут обеспечивать одновременную согласованную реализацию двух метастратегий (см. рис. 3, неplanарная группа  $K_5$ , TOR-1 и метастратегии MS-1 и MS-2). Неplanарные группы, построенные на основе двудольных графов типа  $K_{3,3}$ , ребра которых представляют отношения XOR, могут изменять условия селекции конкурирующих или даже несовместимых альтернативных вариантов одновременной реализации двух метастратегий (см. рис. 3, неplanарная группа  $K_{5,8}$ , TOR-3 и метастратегии MS-2 и MS-3).

Возможность образования областей связности метастратегий и неplanарных групп компонентов, то есть зон перекрытия их компонентного состава, объясняется сосуществованием на каждом компоненте ПС множества моделей взаимодействия между компонентами. Группа нейронов, представляющая компонент ПС, является носителем единой для этой группы информационной модели взаимодействия индивида с институционализированной предметной областью, зафиксированной на каждом нейроне данной группы как их основная специализация. Множество моделей взаимодействий различного типа с другими компонентами ПС фиксируется как дополнительные специа-

лизации подмножеств нейронов группы, представляющей компонент ПС [1, 2, 6].

Приведенное обоснование возможности координации актуализации метастратегий через образование областей их связности с непланарными группами компонентов указывает на то, что формирование ПС реализуется по траектории увеличения сложности и общности организации компонентов и групп компонентов, а не за счет экстенсивного увеличения количества составляющих ПС. Основанием достижимости уровня сложности организации всех составляющих ПС служит общность их происхождения. Анализ генеза составляющих ПС показывает, что положение об общности происхождения всех составляющих ПС должно быть дополнено введением представления о процессах формирования ПС как ауторепликации протоформ этих составляющих и вариаций продуктов репликации (репликантов), которые представляют новое поколение ауторепликаторов, порождающих новый спектр вариаций репликантов, *etc.* [10, 11]. Введение представления об ауторепликации ПС как целостного образования расширяет область применения матричного принципа, развитого в генетике [8]. В настоящее время выделяют матричные процессы I рода, оперирующие одномерными последовательностями (нуклеотидами, аминокислотными остатками), и II рода, оперирующие трехмерными или конформационными матрицами (укладка белков) [8, с. 12]. Использование матричного принципа для объяснения формирования ПС, которые сохраняют общность организации в некоторых пределах при постоянно нарастающей (накапливающейся) вариации организационных характеристик, согласуется с постулатами селективистской теории эволюции о матричном принципе воспроизведения (репликации) генетической основы и о невозможности избежать вариаций (мутаций) продуктов репликации [5]. Процессы ауторепликации ПС оперируют не только одномерными и трехмерными матрицами, но и непланарными торическими матрицами, топология которых описывается эйлеровыми характеристиками  $\chi = 0$  и  $\chi = -2$ . Одномерные и 3-мерные матрицы, не имеющие признаков непланарности, обладают либо плоской, либо сферической топологией и имеют эйлерову характеристику  $\chi = +2$  [4]. Мы полагаем, что организация непланарных групп компонентов, которые могут выполнять роль координаторов согласования процессов актуализации метастратегий, является результатом ауторепликации, относящейся к матричным процессам III рода, которые оперируют объектами с непланарной торической топологией.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-29-22045-мк.

## Литература

1. Александров И.О. Формирование структуры индивидуального знания. М.: Ин-т психологии РАН, 2006.

2. Александров И.О., Максимова Н.Е., Горкин А.Г. Компоненты структуры знания: их взаимодействия и суборганизация // Одиннадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2008: труды конференции. Т. 1. М.: Ленанд, 2008. С. 344–352.

3. Александров И.О., Максимова Н.Е., Турубар Д.С. Виртуальные траектории достижения цели в стратегической игре как побочные продукты взаимодействия с предметной областью // Творчество: наука, искусство, жизнь: материалы Всерос. науч. конф., посвящ. 95-летию со дня рождения Я.А. Пономарева. М.: Институт психологии РАН, 2015. С. 11–15.

4. Александров И.О., Максимова Н.Е., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Эйлерова характеристика непланарностей в топологии психологических структур // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019: труды VI Всероссийской конференции / Федер. исслед. центр Ин-т приклад. физики РАН [и др.]; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2019. С. 18–21.

5. Воронцов Н.Н. Развитие эволюционных идей в биологии. М.: Изд. отдел УНЦ ДО МГУ: Прогресс-Традиция: АБФ, 1999.

6. Горкин А.Г., Кузина Е.А., Ивлиева Н.П., Соловьева О.А., Александров Ю.И. Паттерны активности нейронов ретроспленальной коры в инструментальном пищевом поведении у крыс разного возраста // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2017. Т. 67, № 3. С. 334–340.

7. Евстигнеев В.А., Касьянов В.Н. Толковый словарь по теории графов в информатике и программировании. Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999.

8. Инге-Вечтомов С.Г. Матричный принцип как парадигма современной генетики // Генетика. 2013. Т. 49, № 1. С. 9–15.

9. Максимова Н.Е., Александров И.О. Компоненты психологического взаимодействия и возможность их операционализации // Человек, субъект, личность в современной психологии: материалы конференции. Т. 3. М.: Ин-т психологии РАН, 2013. С. 161–164.

10. Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Ч. 1: Свойства аутореплицирующихся структур и их операционализация // Психологический журнал. 2019. Т. 40, № 1. С. 15–27.

11. Максимова Н.Е., Александров И.О., Заварнова Ю.А., Свиридов В.С., Турубар Д.С. Дифференциация и организация психологических структур при взаимодействии индивида с новыми предметными областями. Ч. 2: Эмпирические доказательства существования аутореплицирующихся структур // Психологический журнал. 2019. Т. 40, № 2. С. 47–65.

12. Микиша А.М., Орлов В.Б. Толковый математический словарь. М.: Русский язык, 1988.

13. Осипов Г.С. Приобретение знаний интеллектуальными системами. М.: Наука, 1997.

14. Харари Ф. Теория графов. М.: Мир, 1973.

15. Шашкин Ю.А. Эйлерова характеристика. М.: Наука, 1984.

# Постулаты теории мышления и их следствия.

## Часть 2: Когнитивная модель мышления

В.А. Антонец

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского; email: antonetsva@gmail.com  
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород; email: antva@appl.sci-nnov.ru

### Введение и постановка проблемы

В предлагаемой работе продолжается попытка построения формальной модели мышления, которая затрагивает исключительно когнитивные процессы. Она не включает в себя ни описания сугубо психофизиологических процессов, ни нейронных механизмов мышления, ни эволюционных механизмов его формирования. Она не рассматривает также никаких содержательных сторон когнитивной деятельности. Модель рассматривает когнитивные процессы исключительно как совокупность операций, осуществляемых субъектом как акцептором, носителем, пользователем и создателем осознанных или неосознанных знаний<sup>1</sup>. При этом предполагается, что в каждый момент времени эти знания субъекта включают в себя конечное число образов конкретных объектов, конечное же число обобщенных категорий или концептов, к которым субъект относит эти конкретные объекты, и, наконец, конечное число символических отображений концептов в коммуникационной системе. Символические отображения концептов могут быть звуковыми (акустическая коммуникация и членораздельная устная речь), зрительными (картинки, знаки, буквы, слова), тактильными (азбука Брайля и т.п.) и, вообще говоря, представлены иными модальностями, которых может и не быть у человека.

Цель работы заключалась в том, чтобы выбрать небольшое количество избранных достоверных фактов, давно и хорошо известных в разных областях науки, сформулировать постулаты, т.е. утверждения, принимаемые за истинные на основании их очевидности и поэтому играющие в какой-либо теории роль аксиомы [2].

Постулаты должны быть сформулированы так, чтобы обеспечить введение формальных переменных (величин) и определить математические операции над ними<sup>2</sup>, которые позволяли бы фор-

<sup>1</sup> Так как когнитивные различия между человеком и, по крайней мере, высшими приматами не носят качественного характера [1], автор осознанно до тех пор, пока это возможно, использует термин «субъект», а не «человек».

<sup>2</sup> При введении формальных переменных теории и операций над ними необходимо дать им имена. Очевидно, для этого придется выбрать известные слова языка, которые в процессе его формирования и использования уже нагружены некоторыми смыслами. Поэтому могут возникнуть обычные для многих областей науки споры терминологического характера, а не по существу. Этот аспект обсуждается далее в тексте статьи. Пока же в неустоявшейся ситуации термины *обобщение*, *понятие*, *категория*, *концепция* и *концепт* будут считаться тожде-

тельно описывать некоторые процессы когнитивной деятельности и логическим путем выводить следствия, которые обычно бывают двух типов.

К первому относится демонстрация и объяснение связи между известными фактами, которые ранее казались независимыми. С точки зрения теории каждый из множества разрозненных фактов оказывается лишь ее проявлением или конкретной реализацией модели в конкретных условиях.

Ко второму относится предсказание моделью свойств и связей между изучаемыми объектами и процессами и даже предсказание существования и свойств не идентифицированных еще объектов. Такое предсказание позволяет планировать новые исследования, результаты которых могут оказаться как согласующимися с моделью, так и ограничивающими область ее применения или вообще опровергающими ее.

Предложенный подход позволил предложить разумную модель освоения языков билингвами в двуязычной среде, а также модель механизма сравнения семантически разнородных объектов.

### Основные постулаты и мотивы их выбора

Центральными, но не единственными постулатами предлагаемой когнитивной модели мышления являются три утверждения, сформулированных автором ранее [3].

**Постулат №1:** *Формирование основных обобщений в форме категорий (концептов), которыми субъект оперирует в своей когнитивной деятельности, может происходить спонтанно без прямого участия сознания и без мотивации путем обобщения потоков информации в процессе накопления жизненного опыта при контакте с объектами окружающего мира.*

Доказательство такой возможности было продемонстрировано в работе [4]. В эксперименте Google сеть из 16 000 компьютерных процессоров, подключенная к сети Интернет обработала около 10 миллионов цифровых изображений, взятых на сервисе YouTube, и самостоятельно обучила себя распознавать изображения кошек. Она без учителя и поощрений смоделировала обобщенное изображение кошки. Руководитель эксперимента Джефф Дин отметил: «Мы никогда не говорили сети в процессе тренировок: „Это кошка“. Таким образом, машина фактически сама изобрела для себя

своими и по смыслу не обязательно совпадать с ранее обозначенными этими словами иными сущностями.

обобщенную концепцию (концепт, категорию – В. А.) кошки» [5].

Из этого результата следуют два вывода.

Во-первых, какое бы определение мы ни давали способности «думать», сеть компьютеров [4] заведомо не обладает ею. В процессе эксперимента она, разумеется, имела дело не непосредственно с изображениями, а с их цифровыми кодами. Следовательно, ее способность спонтанно и без мотивации формировать концепты распространяется не только на изображения, но и на иные формы фиксации жизненного опыта. Из сказанного не следует, что субъект не может быть обучен извне.

Во-вторых, это доказывает, что для реализации хотя бы некоторых элементов когнитивной деятельности не требуется нейронный субстрат.

**Постулат № 2:** *Понятие (категория, концепт), отражаемое лингвистически, возникает путем осознания (consciousness) и присвоения имени уже готовому обобщению и только после этого оно поступает в оборот сознательной деятельности.*

В [3] этот постулат был включен автором в постулат № 1. Однако показанная в [6] со ссылками на [7, 8] связь развития системы устной речи у детей с развитием концептуальных систем заставила выделить это утверждение как отдельное.

Из постулатов № 1 и № 2 следует, что когнитивные процессы обобщения информации, получаемой при накоплении субъектом жизненного опыта, и осознания и присвоения имени концепту являются относительно независимыми. При этом вопреки распространенным представлениям первичным является обобщение, к которому способно множество животных. В частности, известно, что голуби способны сортировать изображения на содержащие и не содержащие в своем составе деревья любого вида. Доказательства же способности номинировать есть лишь в отношении шимпанзе, бонобо и горилл [1].

Тогда перейдем к такому приближению, что субъекты когнитивной деятельности для ее реализации используют как осознанные номинированные концепты, так и неосознанные. При этом самая высокая способность к осознанию и номинированию у человека, более низкая у высших обезьян, а исчезающе малая у эволюционно более низких видов. Разумеется, и внутри популяции homo sapiens способность к осознанию и номинированию имеет разный уровень.

Таким образом, хотя бы в принципе мы можем выделить в каждый момент времени для каждого субъекта когнитивной деятельности три числовые характеристики.

Первая – число концептов  $C_M$ , сформированных при накоплении жизненного опыта. Его можно рассматривать как интеграл (сумму) по времени от потока  $F(t)$  поступающей значимой для субъекта информации:

$$C_M \sim \int F(t) \times \Pi(t) dt. \quad (1)$$

Здесь  $\Pi(t)$  – некая пороговая функция. Ввиду того, что в реальной, конечной по времени жизни субъекта интеграл берется по конечному времени, а  $\Pi(t)$  превышает порог лишь временами,  $C_M$  представляет собой конечное дискретное множество.

Вторая – число содержащихся в памяти актуальных (actual) концептов (обобщений)  $C_A$ , сформировавшихся вследствие жизненного опыта. Оно является разностью между числом сформированных (made)  $C_M$  и забытых (потерянных, lost) концептов  $C_L$ , которые являются подмножествами  $C_M$  в силу их происхождения:

$$C_A = C_M - C_L.$$

Отметим: часть концептов из  $C_A$ , вообще говоря, может быть осознанной,  $C_{A+}$ , часть – нет  $C_{A-}$ .

Множество  $C_A$  содержит все концепты, которыми в каждый момент времени осознанно и/или неосознанно оперирует субъект при восприятии им окружающего и внутреннего миров, а также при принятии решений о персональных действиях и межсубъектных транзакциях.

Третье – число различающихся символических (symbols) отображений концептов  $C_S$ , которые, как упоминалось выше, могут быть звуковыми (акустическая коммуникация и членораздельная устная речь), зрительными (картинки, знаки, буквы, слова), тактильными (азбука Брайля и т.п.) и, вообще говоря, представлены иными модальностями, которых может и не быть у человека. Далее будем считать, что homo sapiens – чемпион по величине  $C_S$ , у эволюционно низких животных  $C_S$  исчезающе мало, а у высших обезьян – в промежутке между человеком и ними.

Остановимся детальнее на человеке. В словаре любого назначения можно увидеть, что приведенные в нем слова обычно обозначают не конкретный объект из потока внешней информации  $F(t)$ , а служат для обозначения (номинирования) нескольких категорий объектов из  $C_M$  и, соответственно,  $C_A$  и  $C_L$ .

Поэтому справедливо неравенство

$$C_S < C_A.$$

Каждому слову из  $C_S$  соответствует подмножество из  $C_A$ . Каждое же содержательное высказывание представляет собой логически упорядоченное подмножество  $C_S$ , которому соответствует комбинация пересечений и объединений подмножеств из  $C_A$ . Так как  $C_S < C_A$ , то их отображение друг на друга не является взаимно однозначным, что приводит к семантической неоднозначности и, как следствие, к взаимонепониманию субъектов. В устной речи за счет нескольких итераций общения эта неоднозначность иногда может быть преодолена.

В работе [3] совокупность областей функционального пространства когнитивной деятельности мозга, где формируются и хранятся обобщения

(концепты), была определена как cognitive loft (CL), или когнитивный чердак, склад (КЧ). Будем рассматривать когнитивный чердак местом размещения множеств  $C_A$  и  $C_S$ .

**Постулат № 3:** На когнитивном чердаке возможны дальнейшие итерации обобщений из уже сформированных обобщений и потока новой информации. В повторном обобщении могут участвовать как осознанные, так и неосознанные обобщения.

Этот постулат вводится по аналогии с тезисом о том, что генерация концептов представляет собой работу с кодами и завершается генерацией кодов. Этот постулат важен, поскольку позволяет объяснить формирование осознаваемого и неосознаваемого опыта, не связанного с поступлением информации непосредственно через органы чувств. Это означает, что в формуле (1) величина «поток информации»  $\Pi(t)$  включает в себя поток не только из внешнего мира, но и из  $C_A$ . В частности, это может быть механизм создания абстрактных теорий и произведений искусства.

### Заключение

Введенные постулаты и переменные на настоящий момент позволяют рассматривать два вида моделей: балансные интегро-дифференциальные модели, описывающие накопление объема осознанных и неосознанных концептов, а также комбинаторные модели, описывающие взаимодействия концептов. На этом пути удалось достичь разумной постановки задач об освоении языка билингвами в двуязычной среде [9, 10] и о способности людей сравнивать семантически разнородные объекты [11, 12].

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № 0030-2021-0014.

### Литература

1. Зорина З.А., Смирнова А.А. О чем рассказали «говорящие» обезьяны: Способны ли высшие животные

оперировать символами? М. : Языки славянских культур, 2006. 424 с. (Studia naturalia).

2. [https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_philosophy/](https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/).

3. Антонец В.А. Постулаты теории мышления и их следствия. Часть 1 // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019 : труды VI Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2019. С. 34–37.

4. Le Q.V., Ranzato M.A., Monga R. et al. Building High-level Features Using Large Scale Unsupervised Learning // Proc. 29th Int. Conf. on Machine Learning. Edinburgh, 2012.

5. [https://en.wikipedia.org/wiki/Jeff\\_Dean](https://en.wikipedia.org/wiki/Jeff_Dean).

6. Вулф М. Пруст и кальмар: нейробиология чтения / пер. с английского. М. : КоЛибри : Азбука\_Аттикус, 2020. С. 122–123. [Wolf, Maryanne. Proust and the Squid: The Story and Science of the Reading Brain. Harper Perennial, 2007. 336 p.]

7. Ostler N. Empires of the Word: A Language History of the World. New York : HarperCollins, 2005.

8. Pease D.M., Gleason J.B., Pan B.A. Learning the Meaning of Words: Semantic Development and Beyond // The Development of Language / J.B. Gleason (ed.). 3rd ed. New York : Macmillan, 1993.

9. Александрова Н.Ш., Антонец В.А., Нуйдель И.В., Шемагина О.В., Яхно В.Г. Моделирование режимов спонтанного освоения нескольких языков как инструментов общения // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019 : труды VI Всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2019. С. 27–30.

10. Alexandrova N.S., Antonets V.A., Kuzenkov O.A., Nuidel I.V., Shemagina O.V., Yakhno V.G. Bilingualism as an Unstable State // Velichkovsky B.M., Balaban P.M., Ushakov V.L. (eds) Advances in Cognitive Research, Artificial Intelligence and Neuroinformatics. Cham : Springer, 2021. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-71637-0\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71637-0_41).

11. Антонец В.А., Левчук И.В. Субъективная оценка значимости семантически разнородных объектов при транзакциях обмена // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 75–82.

12. Antonets V.A. Simulation of intuitive evaluation of unlike semantic objects // XXI Международная научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2019» : сб. научных трудов. В 2 ч. Ч. 1. М. : МФТИ, 2019. С. 141–149.

# Сегментная спайковая модель нейрона (CSNM)

А.В. Бахшиев, А.А. Демчева

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого

## 1. Введение

В последнее десятилетие теория и практики искусственных нейронных сетей достигли ряда значимых результатов в решении задач машинного обучения [1], однако вопрос создания аппаратных энергетически эффективных нейроморфных вычислителей по-прежнему остается открытым [2]. Разработка аппаратных реализаций спайковых нейронных сетей является одним из перспективных решений этой проблемы [3].

Несмотря на достигнутые успехи, глубокие нейронные сети испытывают ряд проблем, связанных с ограниченной обобщающей способностью, особенно в условиях изменяющейся среды [4]. Поэтому исследование структуры и принципов функционирования нервной системы с целью предложения новых архитектур и методов обучения искусственных нейронных сетей остается по-прежнему актуальным. В этом направлении применение спайковых моделей нейронов и нейронных сетей перспективно как для описания поведения естественных нейронных структур, так и для моделирования нейроморфных систем управления и обработки информации.

В настоящее время в спайковых нейронных сетях применяются в основном достаточно простые точечные модели нейронов, такие как модель порогового интегратора (Integrate-and-Fire) и ее модификации, SRM0 [5]. Более сложные биофизические модели (например, модель Ходжскина – Хаксли [6]), как правило, не применяются в силу высокой вычислительной сложности.

В биологии одним из основных способов достижения пластичности нервной системы является рост дендритного дерева и синаптического аппарата нейрона, участвующего в запоминании информации и формировании новых паттернов активности. Существующая кабельная теория [7] и сегментные модели нейронов [8] позволяют описать специфику дендритных деревьев, однако не вполне удобны для моделирования спайковых нейронных сетей.

В работах [9, 10] была представлена сегментная спайковая модель нейрона. Ее особенностью является возможность формировать требуемую реакцию нейрона, оперируя такими гиперпараметрами, как размер нейрона, длина дендритов, число возбуждающих или тормозных синапсов, не переходя к параметрической настройке. Анализ показал, что модель описывает 13 биологических признаков нейронов по шкале признаков, приведенной в работе [11]. Модель применялась для исследования систем управления и обработки информации, базирующихся на приближенных к биологии моделях нейронных сетей [12]. Недостатком этой модели является несовместимость

функциональных элементов (синапс, сегмент мембраны, низкопороговая зона) по входам и выходам с классическими моделями. Также реализация генератора спайков для стабилизации длительности выходного импульса содержит дополнительное неадаптивное инерционное звено, негативно влияющее на общие инерционные свойства нейрона.

В этой работе мы представляем обновленную сегментную спайковую модель нейрона (Compartment Spiking Neuron Model – CSNM), свободную от указанных недостатков.

## 2. Модель нейрона

### 2.1. Архитектура модели

На рис. 1 представлена структурно-функциональная схема модели [10]. Предполагается, что на вход поступают спайки, которые преобразуются в синапсах в выходную величину, моделирующую влияние синаптического тока на сегмент мембраны нейрона.

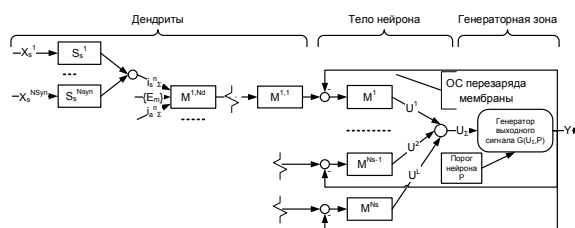


Рис. 1. Структурно-функциональная схема модели нейрона

Полагаем, что нейроны обмениваются информацией через события, которые можно представить как:

$$x = \begin{cases} E_y, & t_i < t < t_i + \Delta t, \\ 0, & t \neq t_i, \end{cases}$$

где  $E_y$  – амплитуда входного импульса;  $t_i$  – время начала формирования входного спайка,  $\Delta t$  – длительность импульса.

Сегменты мембраны тела нейрона и дендритов представляются набором пар ионных механизмов, описывающих механизмы деполяризации и гиперполяризации. Выходом сегмента мембраны является пара значений гиперполяризации и деполяризации, определяющая их вклад в суммарный потенциал.

Генератор выходного сигнала формирует выходной импульс, который может быть передан другим нейронам сети, а также формирует сигнал обратной связи на сегменты мембраны тела клетки, что позволяет описывать переходные процессы, возникающие во время генерации импульса.

Такая структурная организация модели нейрона позволяет проводить расчет систем дифференциальных уравнений для каждого нейрона независимо, поскольку нейроны обмениваются исключительно информацией о моменте времени возникновения спайка, а входной вектор системы уравнений модели нейрона формируется внутри модели как функция от моментов времени прихода спайков.

Система в целом характеризуется набором из следующих гиперпараметров: размер нейрона  $N_s$  (число блоков-моделей сегмента мембраны), длина дендритов  $N_d$  и число возбуждающих или тормозных синапсов (число соответствующих блоков в модели)  $N_{syn}$ . Их значения задают общий вид системы и позволяют сформировать требуемую реакцию нейрона.

Далее будет рассмотрено математическое описание моделей функциональных элементов нейрона.

## 2.2. Модель синаптической передачи

На вход модели синапса (2) поступает сигнал с выхода другого нейрона вида (1). Выходным значением является синаптический ток. Модель синапса реализует основные особенности функционирования синаптической передачи – экспоненциальный характер выделения и распада медиатора, различие в скоростях протекания этих процессов и эффект пресинаптического торможения. Модели возбуждающих и тормозных синапсов идентичны друг другу, различие в их воздействии на сегмент мембраны определяется тем, к какому из ионных механизмов подключен каждый конкретный синапс.

Уравнения модели синапса:

$$\left. \begin{aligned} T_S(t) \cdot \frac{d\rho}{dt} &= x - \rho(t), \\ g &= F_{\text{PreI}}(\rho), \\ i_S &= g \cdot \frac{\epsilon_S}{R_S} \cdot w, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $R_S > 0$  – сопротивление синапса,  $\epsilon_S$  – электродвижущая сила (ЭДС) синаптической передачи,  $g$  – временная переменная, описывающая активность синапса с учетом эффекта пресинаптического торможения,  $w$  – вес синаптической передачи,  $i_S$  – выходной синаптический ток,  $\rho$  – характеризует условную концентрацию медиатора, выделившегося в ответ на импульс. Начальные условия:  $\rho(0) = 0$ .

В уравнении выше  $T_S$  представляет собой постоянную времени, определяемую по формуле

$$T_S = \begin{cases} \tau_S, & x > 0, \\ \tau_d, & x \leq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau_S$  – постоянная времени выделения медиатора,  $\tau_d$  – постоянная времени распада медиатора.

$F_{\text{PreI}}(\rho)$  – функция, имитирующая эффект пресинаптического торможения и описываемая в виде

$$F_{\text{PreI}}(\rho) = \max \left( 0, \begin{cases} 4 \cdot \zeta \cdot (\rho - \zeta \cdot \rho^2), & \zeta \geq 0, 5, \\ \rho, & \zeta = 0 \end{cases} \right), \quad (3)$$

где  $\zeta \in 0, [0, 5, \infty)$  – критическое значение концентрации медиатора, при котором начинает сказываться эффект пресинаптического торможения (нулевая величина означает отказ от использования эффекта пресинаптического торможения).

Заметим, что в данной модели вклад в меру эффективности воздействия синапса на сегмент мембраны вносят как его физические параметры  $R_S$  и  $\epsilon_S$ , так и вес  $w$ . Это связано с унификацией использования модели синапса – в режиме оптимизации параметров нейронной сети (например, по правилу STDP – Spike-timing dependent plasticity) модификации подвергается вес  $w$ . В режиме же структурной адаптации вес синапса принимается равным единице, а физические параметры модели подбираются исходя из специфики моделируемой структуры связей.

Процесс выделения и распада медиатора в модели описывается инерционным звеном первого порядка с логическим управлением постоянной времени. Переменная  $\rho$  характеризует условную концентрацию медиатора, выделившегося в ответ на импульс.

Непосредственно на ионный механизм мембраны нейрона оказывает влияние синаптический ток  $i_S$ , пропорциональный эффективной проводимости синапса.

## 2.3. Модель сегмента мембраны

В работах [9, 10] предложена модель ионного механизма, который имеет три основные характеристики: сопротивление  $R_m$ , емкость  $C_m$  и концентрацию ионов  $E_m$ , поддерживаемую насосной функцией канала внутри клетки. Произведение  $T_m = R_m C_m$  характеризует инертность канала, т. е. скорость восстановления нормальной концентрации ионов в клетке.

Модель ионного механизма отражает изменение потенциала мембраны в зависимости от влияния синапса, заключающегося в потере эффективности насосной функции канала и в снижении концентрации ионов в клетке с постоянной времени этого процесса:  $T = R^l C_m$ .

Сопротивление  $R^l$  определим из соотношения

$$\frac{1}{R^l} = \frac{i_{s1}}{\epsilon_{s1}} + \frac{i_{s2}}{\epsilon_{s2}} + \dots + \frac{i_{sn}}{\epsilon_{sn}} + \frac{1}{R_m} = g_\Sigma + \frac{1}{R_m}, \quad (4)$$

где  $i_{s1}, i_{s2}, \dots, i_{sn}$  – синаптические токи активных синапсов, действующих на данный ионный механизм;  $\epsilon_{s1}, \epsilon_{s2}, \dots, \epsilon_{sn}$  – ЭДС синапсов;  $g_\Sigma = \frac{i_{s\Sigma}}{\epsilon_s}$  – суммарная проводимость моделей активных си-

напсов,  $i_{\Sigma}$  – суммарный синаптический ток,  $R_m > 0$  – сопротивление мембраны. Далее будем считать, что ЭДС всех синапсов равны.

Соответствующая система уравнений приведена ниже.

$$\left. \begin{aligned} T_I \cdot \frac{du}{dt} &= u_{\Sigma} - (1 + g_{\Sigma} \cdot R_m) \cdot u, \\ T_I &= \frac{C_m}{g_{\Sigma} + R_m^{-1}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $C_m$  – емкость мембраны,  $u_{\Sigma}$  – ожидаемый вклад модели в величину внутриклеточного потенциала при отсутствии внешнего возбуждения. Данная величина определяется активностью соседних участков мембраны,  $u$  – реальный вклад модели в величину внутриклеточного потенциала. Начальные условия:  $u(0) = 0$ .

Инерционные свойства модели ионного механизма описываются апериодическим звеном с управляемой постоянной времени.

Модель сегмента мембраны структурно состоит из одного или нескольких ионных механизмов и синапсов. Таким образом, каждый сегмент имеет два вектора входов – синаптических входов  $X$  и ожидаемых вкладов в мембранный потенциал  $U_{\Sigma}$  – и один вектор выходов  $U$ .

#### 2.4. Модель генератора выходного сигнала

Еще одно важное звено рассматриваемой модели – генератор выходного сигнала, формирующий события генерации нейроном спайка. Выходное значение нейрона определяется следующим выражением:

$$y = F_G(\bar{U}, P_{act}, P_{rest}), \quad (6)$$

где  $\bar{U}$  – среднее значение потенциала с участков мембраны тела нейрона,  $y$  – выходное событие генерации спайка,  $F_G(\bar{U})$  – функция гистерезиса, возвращающая 1 при превышении  $\bar{U}$  порога  $P_{act}$ , и 0, если значение  $\bar{U}$  становится ниже порога  $P_{rest}$ ,  $t_j$  – момент времени превышения порога  $P_{act}$ . Формируемый выходной сигнал  $y$  поступает в обратные связи перезаряда тела нейрона, что позволяет описывать эффекты абсолютной и относительной рефрактерности, а также остаточной деполяризации нейрона после генерации импульса.

### 3. Эксперименты

#### 3.1. Анализ реакций точечной модели на одиночный спайк

Для сравнения предложенной модели с классической моделью порогового интегратора было выполнено моделирование реакции на импульсное воздействие. Используемые в экспериментах модели доступны по ссылке [13].

Для обеих моделей было задано единое входное воздействие. На выходе были получены зави-

симости от времени потенциала мембраны как реакция на поступивший импульс.

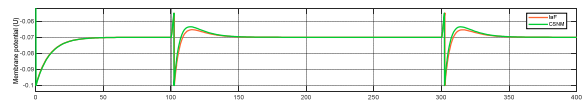


Рис. 2. Сравнение реакций моделей CSNM и IaF на одиночный спайк

На рисунке 2 изображены результаты моделирования. Графики потенциала мембраны для двух рассматриваемых моделей схожи по предельным амплитудам и временным задержкам. Качественные отличия в форме импульса определяются различием в математическом описании моделей (более сложная модель синапса, ионных механизмов и генератора потенциала действия в разработанной модели нейрона).

#### 3.2. Влияние гиперпараметров модели на возбуждение

Был проведен ряд экспериментов по исследованию поведения модели в зависимости от структурных параметров. Для проведения экспериментов порог нейрона был искусственно завышен, чтобы исключить генерацию выходных спайков. Таким образом были получены зависимости пиковой величины потенциала от размера тела  $N_s$  и длины дендрита (рисунок 3), от числа активных синапсов  $N_{syn}$  (рисунок 4).

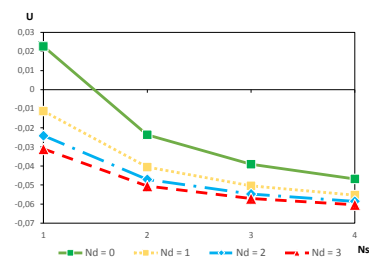


Рис. 3. Зависимость величины потенциала от размера тела нейрона при различных длинах дендрита

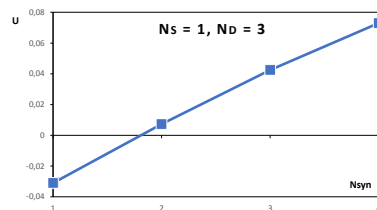
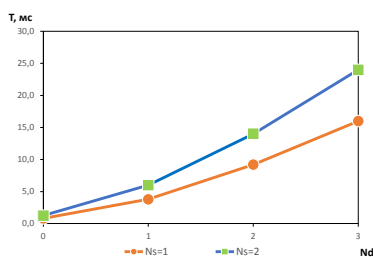


Рис. 4. Зависимость величины потенциала от числа активных синапсов

По результатам экспериментов можно видеть, что при одинаковом входном воздействии максимальный потенциал более крупного нейрона ( $N_s > 1$ ) нелинейно уменьшается. Аналогичная картина наблюдается при изменении длины дендрита. Зависимость величины потенциала от числа активных синапсов демонстрирует рост, близкий к линейному на выбранном диапазоне  $N_{syn}$ .





**Рис. 5.** Зависимость времени задержки между входным и выходным спайками от длины дендрита и размера нейрона

На рисунке 5 показана зависимость величины задержки формирования выходного спайка от места расположения синапса (или иначе – длины дендрита  $N_d$ ) и размера нейрона  $N_s$ . Таким образом, можно сделать вывод о возможности оптимизировать структуру нейрона под входные паттерны импульсов. При этом параметр  $N_s$  будет определять общую инерционность нейрона,  $N_d$  – величину задержки в срабатывании по приходу сигнала по данному дендриту,  $N_{syn}$  – величину амплитуды потенциала (и как следствие – частоту выходных спайков).

#### 4. Заключение

Предложенная модель сегментного спайкового нейрона позволяет описывать поведение биологических нейронов на уровне преобразования спайковых сигналов. Гиперпараметры модели позволяют осуществлять настройку реакций нейрона при фиксированных остальных параметрах. Такая модель может использоваться как элемент спайковых нейронных сетей с детализацией до уровня сегментов дендритных деревьев нейронов. В рамках дальнейших исследований ведется работа по созданию архитектуры и алгоритмов обучения сегментных спайковых нейронных сетей для решения задач машинного обучения. В перспективе планируется создание аппаратных реализаций сегментных спайковых нейронных сетей.

Работа выполнена в СПбПУ Петра Великого в рамках проекта «Разработка спайковой сегментной модели нейрона как элемента растущих нейронных сетей».

#### Литература

1. 1. *Shrestha A., Mahmood A.* Review of deep learning algorithms and architectures // *IEEE Access / Institute of*

*Electrical and Electronics Engineers Inc.* 2019. V. 7. P. 53040–53065.

2. *James C.D. et al.* A historical survey of algorithms and hardware architectures for neural-inspired and neuromorphic computing applications // *Biologically Inspired Cognitive Architectures*. 2017. V. 19. P. 49–64.

3. *Tavanaei A., Ghodrati M., Kheradpisheh S.R., Masquelier T., Maida A.* Deep learning in spiking neural networks. *Neural Networks*. 2019. V. 111. P. 47–63.

4. *Marcus G.* Deep Learning: A Critical Appraisal. 2018. P. 1–27.

5. *Gerstner, W., Kistler, W.* Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge University Press, 2002; doi:10.1017/CBO9780511815706.

6. *Hodgkin A.L., Huxley A.F.* A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *Bull. Math. Biol.* 1990. V. 52. P. 25–71; doi: 10.1007/BF02459568.

7. *Bell J.* Cable Theory // *Binder M.D., Hirokawa N., Windhorst U.* (eds) Encyclopedia of Neuroscience. Berlin: Heidelberg: Springer, 2009. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2\\_775](https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_775).

8. *Lindsay, A.E., Lindsay, K.A., Rosenberg, J.R.* Increased computational accuracy in multi-compartmental cable models by a novel approach for precise point process localization // *Journal of Computational Neuroscience*. 2005. V. 19, № 1. P. 21–38.

9. *Бахшиев А.В., Романов С.П.* Воспроизведение реакций естественных нейронов как результат моделирования структурно-функциональных свойств мембраны и организации синаптического аппарата // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2012. № 7. С. 25–35.

10. *Bakhshiev A., Gundelakh F.* Mathematical Model of the Impulses Transformation Processes in Natural Neurons for Biologically Inspired Control Systems Development // *Supplementary Proceedings of the 4th International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST-SUP 2015)*, Yekaterinburg, Russia, April 9–11, 2015. Published on CEUR-WS. 15.10.2015. V. 1452. P. 1–12.

11. *Izhikevich E.M.* Simple model of spiking neurons // *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2003. V. 14, № 6. P. 1569–1572; doi: 10.1109/TNN.2003.820440.

12. *Бахшиев А.В.* Перспективы применения моделей биологических нейронных структур в системах управления движением // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2011. № 9. С. 71–80.

13. <https://github.com/aicomunity/NeuroMatlab>.

# Структурная адаптация сегментной спайковой модели нейрона

А.В. Бахшиев<sup>2</sup>, А.М. Корсаков<sup>1</sup>, Л.А. Астапова<sup>1</sup>, Л.А. Станкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург  
email: anton\_korsakov@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого  
email: palexab@gmail.com

## Введение

Предлагаемое в статье исследование находится в русле решения актуальной фундаментальной научной задачи, которой является развитие знаний в области синтеза интеллектуальных систем управления и обработки информации на основе нейросетевого подхода. В современной парадигме искусственных нейронных сетей во главу угла ставится формализация и последующее решение частной прикладной задачи в контексте, заранее определенном обучающей выборкой.

Новые компоненты и архитектуры глубоких нейронных сетей на основе нейроморфного подхода и специальные алгоритмы их обучения позволяют создавать универсальные системы, эффективно решающие множество задач в пространствах высокой размерности. Для этого необходимо разработать методы синтеза и обучения нейроморфных систем, способных адаптироваться, в частности, к изменению в формальной постановке и условиях решаемой задачи.

Как известно, биологические нейронные сети обладают свойством пластичности и способностью к непрерывному обучению, дополнению и корректировке существующих знаний на основе новой поступившей информации после взаимодействия с постоянно изменяющейся средой. Такие отличительные черты биологических нейронных сетей обуславливаются динамической адаптацией нейронной сети: изменением размеров нейронов, построением и разрушением нейронных связей.

Для существенного увеличения адаптивной способности спайковых нейронных сетей представляется необходимым рассматривать не только параметрическую, но и структурную адаптацию нейронных сетей, как на уровне изменения топологии связей между узлами (нейронами) сети, так и на уровне усложнения модели каждого узла путем перехода к сегментным (компаратментным) моделям нейронов.

Биологические принципы работы головного мозга вдохновили исследователей на создание спайковых динамически развивающихся нейронных сетей (eSNN), способных работать в реальном времени. Для большинства спайковых нейронных сетей создана традиционная стратегия развития, которая не фиксирует структуру, а регулирует количество нейронов в процессе обучения, а также в динамическом режиме адаптирует веса нейронов в реальном времени [1–5].

В качестве альтернативы такой стратегии развития в настоящей работе предлагается подход,

связанный со структурной адаптацией самой модели нейрона. Конкретной задачей данной работы являлась разработка принципов построения нейроморфных систем с динамически изменяющейся структурой элементов модели нейрона, таких как количество участков мембраны сомы нейрона, длина и количество дендритов, количество и расположение синапсов. Посредством такой адаптации происходило обучение отдельной модели нейрона паттерну импульсов с последующим распознаванием данного паттерна обученной моделью нейрона.

## Спайковая сегментная модель нейрона

В основу настоящей работы положена модель, предложенная в [6]. В данной модели предполагается, что на входы модели поступают импульсные потоки, которые преобразуются в синапсах в аналоговые величины, описывающие процессы выделения и распада медиатора в синаптической щели. Входные и выходные сигналы нейрона равны нулю в отсутствии импульса и константе на время действия импульса. Структурная схема рассматриваемой модели показана на рисунке 1.

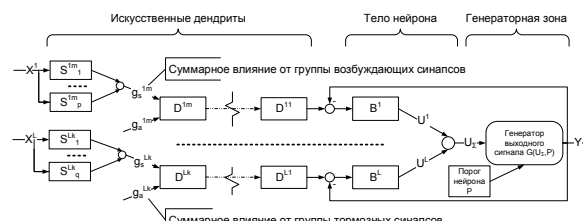


Рис. 1. Структурная схема спайковой сегментной модели нейрона

Отметим особенности модели нейрона, играющие существенную роль при решении задачи структурного обучения модели нейрона:

- возможность создания произвольного числа сегментов тела нейрона. С точки зрения решаемой в настоящей работе задачи это означает возможность изменять размерность входного паттерна импульсов;
- возможность независимого наращивания длин дендритов. Увеличение длины дендрита приводит к временной задержке сигнала и к уменьшению его амплитуды;
- возможность добавления произвольного числа синапсов на произвольном участке мембраны (теле, дендрите). Добавление синапса приводит к увеличению амплитуды сигнала;

- возможность произвольной организации связей (как возбуждающих, так и тормозных) между отдельными элементами.

Всё вышеперечисленное означает возможность структурного реконфигурирования модели нейрона, что, в свою очередь, позволяет изменять время и амплитуду прихода сигнала с каждого из дендритов на сому нейрона.

### Структурная адаптация модели нейрона

Под паттерном импульсов будем понимать совокупность сигналов, поступающих на входы нейрона (дендриты) за некоторый (выбранный) промежуток времени. Отдельный входной сигнал представляет собой одиночный импульс единичной амплитуды. Соответственно отдельные сигналы в паттерне имеют одинаковую (единичную) амплитуду, но в общем случае различное время поступления на соответствующий вход (дендрит) нейрона. Считаем, что за выбранный промежуток времени поступления паттерна на отдельном входе (дендрите) может быть зафиксировано не более одного входного сигнала.

Актом распознавания данного конкретного паттерна будем считать генерацию моделью нейрона выходного сигнала. Выходной сигнал генерируется в низкопороговой зоне нейрона (генератор потенциала действия) и представляет собой одиночный импульс либо серию импульсов единичной амплитуды, формируемых при превышении величиной потенциала порога. Само же значение потенциала внутри низкопороговой зоны нелинейно связано с суммой сигналов, пришедших на вход нейрона. Таким образом, для преодоления порога и генерации потенциала действия нам необходимо максимизировать сумму вкладов в потенциал внутри низкопороговой зоны от всех дендритов, что может быть достигнуто синхронизацией действия входных сигналов в нейроне.

Как было показано выше, это может быть достигнуто путем добавления в модель отдельных сегментов дендритов. Однако, как показано там же, это приводит к уменьшению амплитуды входного сигнала на данном дендрите, что могло бы стать препятствием для выбора фиксированного, универсального для всех входных паттернов, порога генерации. Данная проблема решается добавлением синапсов на конечный сегмент дендрита. Это приводит к увеличению амплитуды входного сигнала, что компенсирует потерю амплитуды при добавлении новых сегментов дендрита.

Процедуру наращивания длины модели дендрита будем называть синхронизацией, тогда как процедуру добавления моделей синапсов – нормализацией. Таким образом, нашей задачей является максимизация потенциала внутри низкопороговой зоны нейрона путем синхронизации и нормализации с целью вызвать генерацию потенциала действия. Процессы синхронизации и нормализации для конкретного паттерна будем называть обучением нейрона на данном паттерне импульсов. Генерацию потенциала действия при фиксированном

паттерне импульсов и соответствующей ему конфигурации обученного нейрона будем называть распознаванием данного паттерна импульсов.

### Исследование алгоритма синхронизации сигналов

Создание моделей реконфигурируемых растущих нейронных сетей подразумевает необходимость обеспечить возможность описывать системы, в которых заранее не определена как топология связей между элементами системы, так и структурное описание и топология связей составных частей элементов системы. Для решения поставленной задачи использовалась программная платформа, описанная в [7].

В описываемом эксперименте использовалась модель нейрона с четырьмя сегментами сомы. В качестве входного паттерна импульсов был выбран следующий вектор задержек (указано время в секундах): (0,09; 0,06; 0,03; 0). Инициализированная модель нейрона представлена на рисунке 2.

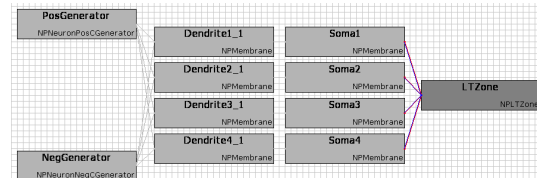


Рис. 2. Модель спайкового нейрона, готовая к обучению: DendriteI\_J – j-й сегмент i-го дендрита, SomaI – i-й сегмент сомы, LTZone – генератор потенциала действия

После инициализации модели на ее вход подавался выбранный паттерн импульсов с частотой 0,5 Гц. Кривые потенциалов для каждого из дендритов после первой итерации приведены на рисунке 3. Кривая, обозначенная цифрой «1», соответствует суммарному потенциалу всех дендритов, остальные кривые – отдельным дендритам.

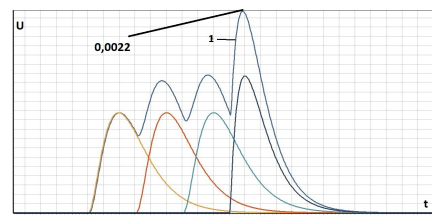


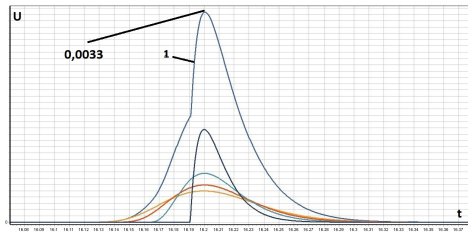
Рис. 3. Кривые потенциалов для каждого из дендритов после первой итерации процедуры синхронизации

После завершения процесса синхронизации структура модели нейрона из начального состояния (рисунок 2) приобретает вид, представленный на рисунке 4.



Рис. 4. Модель нейрона после завершения синхронизации: DendriteI\_J – j-й сегмент i-го дендрита, SomaI – i-й сегмент сомы, LTZone – генератор потенциала действия

После подачи на вход модели нейрона с завершенной синхронизацией выбранного паттерна импульсов, кривые потенциалов для каждого из дендритов приобретают вид, представленный на рисунке 5.

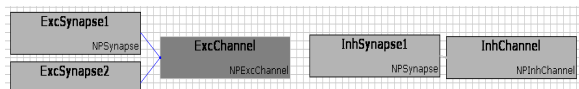


**Рис. 5.** Кривые потенциалов для каждого из дендритов после завершения процедуры синхронизации

Кривая, обозначенная цифрой 1, соответствует суммарному потенциалу всех дендритов, остальные кривые – отдельным дендритам. Как видно из рисунка 5, задача синхронизации была решена.

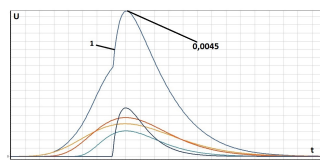
### Исследование алгоритма нормализации сигналов

Задачей нормализации входного паттерна импульсов являлась компенсация потерь в значениях амплитуды потенциала отдельного дендрита при наращивании его длины. Входной конфигурацией для процедуры нормализации являлась схема модели нейрона, изображенная на рисунке 4. Кривые потенциалов для каждого из дендритов до начала нормализации приведены на рисунке 5. После завершения процесса нормализации структура модели последнего сегмента дендрита имела вид, представленный на рисунке 6.



**Рис. 6.** Добавление синапсов на последний сегмент дендрита: ExcSynapse1 – i-й возбуждающий синапс; ExcChannel – возбуждающий ионный канал, InhSynapse1 – i-й тормозный синапс, InhChannel – тормозный ионный канал

После подачи на вход модели нейрона с завершенной нормализацией выбранного паттерна импульсов кривые потенциалов для каждого из дендритов приобретают вид, представленный на рисунке 7.



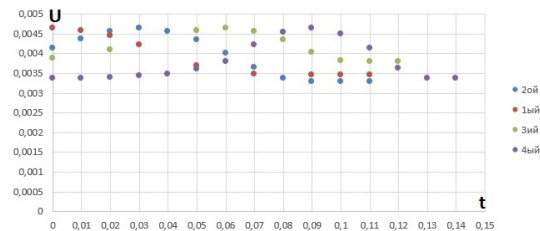
**Рис. 7.** Кривые потенциалов для каждого из дендритов после завершения процедуры нормализации

Кривая, обозначенная цифрой 1, соответствует суммарному потенциалу всех дендритов, остальные кривые – отдельным дендритам. Как видно из рисунка 7, задача нормализации была решена. По-

сле завершения процесса нормализации модель нейрона приобретает способность генерировать потенциал действия (выходной импульс) на входной паттерн импульсов, которому данная модель была обучена.

### Исследование реакций обученной модели нейрона на входные паттерны

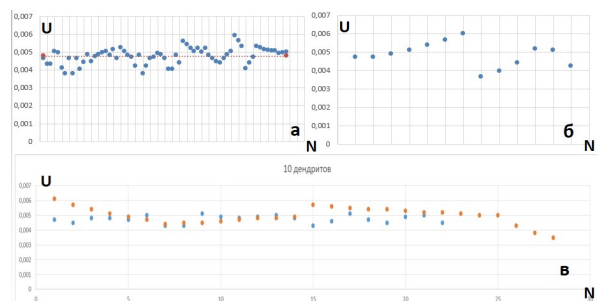
Задачей данного эксперимента являлось установление зависимости потери суммарной амплитуды потенциалов дендритов при временном смещении сигналов во входном паттерне импульсов. Полученная зависимость представлена на рисунке 8.



**Рис. 8.** Зависимость потери максимума суммарной амплитуды потенциалов моделей дендрита при временном смещении сигналов паттерна импульсов

Точками разных цветов обозначены значения потенциала внутри низкопороговой зоны нейрона, соответствующие смещению отдельных сигналов паттерна импульсов. Из графика видно, что влияние отдельного дендрита на формирование суммарной амплитуды потенциала дендритов полностью пропадает при смещении соответствующего входного сигнала в паттерне на 50 мс. Потеря суммарной амплитуды потенциалов дендритов при таком – максимальном – смещении выражается значением  $(1 / N) \cdot 100 \%$ , где  $N$  – общее количество моделей дендритов.

Следующая серия экспериментов была посвящена нахождению универсального порога срабатывания нейрона на паттерн импульсов, которому он ранее обучался. Результаты экспериментов приведены на рисунке 9.



**Рис. 9.** Суммарные амплитуды потенциалов моделей дендрита, полученные для различных паттернов импульсов

На рисунке 9 каждая отдельная точка соответствует одному эксперименту (по оси абсцисс отложены номера экспериментов). Серия экспери-

ментов «а» отвечает модели нейрона с четырьмя дендритами, серия экспериментов «б» – модели нейрона с шестью дендритами, серия экспериментов «в» – модели нейрона с десятью дендритами.

Для каждого эксперимента выбирался свой, отличный от всех других, паттерн импульсов. Модель нейрона обучалась выбранному паттерну импульсов, после чего измерялся максимум суммарной амплитуды потенциалов моделей дендритов при стимуляции нейрона данным паттерном. Как видно из рисунка 9, все значения суммарной амплитуды потенциалов дендритов, независимо от числа дендритов в модели нейрона, укладываются в один и тот же коридор значений. Это позволяет подобрать универсальный порог срабатывания модели нейрона на паттерн импульсов, которому она ранее обучалась. При использовании стандартных настроек модели эта безразмерная величина оказалась равной 0,0035.

Другим важным выводом, который можно сделать из рисунка 9, является наблюдение, что для ряда моделей нейронов, обученных на паттернах импульсов, для которых их суммарные амплитуды потенциалов дендритов принимают высокие значения (порядка 0,0055–0,006), и учитывая выводы, сделанные по итогам первой серии экспериментов (рисунок 8), срабатывание модели нейрона может произойти даже при отсутствии сигналов на части дендритов входного паттерна импульсов. В предельном случае доля дендритов, сигналы которых оказываются незначимыми с точки зрения распознавания паттерна импульсов, доходит до 33 %.

### Заключение

В настоящей статье использовалась разработанная авторами модель нейрона, позволяющая производить структурную адаптацию самой модели нейрона путем добавления структурных элементов такой модели (сегменты сомы и дендритов, синапсы). В статье рассмотрен использующий такой подход метод структурной адаптации модели нейрона к произвольному паттерну импульсов. Процесс структурной адаптации рассматривался как процесс обучения модели нейрона данному паттерну. По завершении процесса обучения нейрон приобретал возможность распознавать паттерн импульсов, которому он был ранее обучен.

По результатам экспериментов в качестве важного вывода можно отметить, что для ряда

нейронов генерация потенциала действия может произойти даже при отсутствии входных сигналов на части дендритов. Оценить значение последнего вывода планируется в ходе дальнейшего развития данной работы, которое будет заключаться в создании сетей из заранее обученных спайковых моделей нейронов для решения задачи классификации отдельных паттернов импульсов.

В качестве основного недостатка предлагаемого метода следует отметить отсутствие возможности переобучения отдельного нейрона в автоматическом режиме. Поиск решения для устранения этого недостатка в русле нейроморфного подхода также является перспективным направлением развития работ по данной тематике.

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00913-21-01 «Разработка и исследование новых архитектур реконфигурируемых растущих нейронных сетей, методов и алгоритмов их обучения».

### Литература

1. *Soltic S., Kasabov N. K.* Knowledge extraction from evolving spiking neural networks with rank order population coding // *International Journal of Neural Systems*. 2010. V. 20, № 6. P. 437–445.
2. *Wysoski S.G., Benuskova L., Kasabov N.K.* Evolving spiking neural networks for audiovisual information processing // *Neural Networks*. 2010. V. 23, № 7. P. 819–835.
3. *Wang J., Belatreche A., Maguire L.P., McGinnity T.M.* SpikeTemp: An Enhanced Rank-Order-Based Learning Approach for Spiking Neural Networks With Adaptive Structure // *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2017. V. 28, № 1. P. 30–43.
4. *Dora S., Subramanian K., Suresh S., Sundararajan N.* Development of a Self-Regulating Evolving Spiking Neural Network for classification problem // *Neurocomputing*. 2016. V. 171. P. 1216–1229.
5. *Belatreche A., Maguire L.P., McGinnity M.* Advances in Design and Application of Spiking Neural Networks // *Soft Computing*. 2017. V. 3, № 11. P. 239–248.
6. *Bakhshiev A.V., Gundelakh F.V.* Mathematical Model of the Impulses Transformation Processes in Natural Neurons for Biologically Inspired Control Systems Development // *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. V. 1452. P. 1–12.
7. *Bakhshiev A.V., Fomin I.S., Gundelakh F.V., Demcheva A.A., Korsakov A.M.* The architecture of a software platform for growing spiking neural networks simulator developing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1679. P. 042001.

# Варианты решения проблемы понимания на основе технологии прямого наложения знаний

Г.Б. Бронфельд, Д.И. Киров

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева  
email: stolem1985@gmail.com, tmdagger2000@gmail.com

## Введение

В последние десятилетия в результате усиления роли информационных технологий все отчетливее проявляется проблема понимания текста.

Долгое время тексты писались вручную на отдельных листах и стали определенным образом сшиваться. Потом появилась печатная книга, произошел революционный переворот в практике размножения информации [1]. Это предопределило появление на Земле нового типа развития человечества – «эру человека печатной книги» [2]. Последующее развитие средств коммуникации, в том числе с использованием ЭВМ, резко ускорило развитие человечества. Это привело к переходу в «эру массовых коммуникаций» [2]. Произошло захлестывание людей новой информацией и знаниями, наступил период сатурации (перенасыщения знаниями), что даже приводит к задержке развития [3, 4]. Применение Интернета, информационных систем (ИС) [5] и «облачных» технологий повысило эффективность работы с информацией, но не снизило остроту проблем работы со знаниями. Параллельно происходит переход с бумажных носителей информации на электронные, и уже появился такой носитель, как «электронная книга». Однако знания постепенно утрачиваются и человек постепенно теряет понимание фактов и технологий, которые были известны и использовались, в том числе из-за языковых изменений [1].

Ситуация с пониманием в связи с этим еще более обострилась. Проблематикой понимания занимались и занимаются философы [6], лингвисты [7–10], психологи [11], религиозные учения, педагоги [12]. Ну и, конечно, представители всех научно-технических направлений [13–17], включая направление «искусственный интеллект» (ИИ) [15–17]. Ведь на «правильном» понимании основаны все науки и техника, их развитие и вообще безаварийная работа сложнейших технических, организационных и технологических систем людей, некоторые из них охватывают весь мир, например Интернет или космические системы.

Какие же основные барьеры оказываются на пути понимания? Первый, конечно, нечеткость естественного языка (ЕЯ) [8, 9], включая проблемы с омонимией, синонимией, метафорами и т.п. [9, 10]. Второй, конечно, – это индивидуальное восприятие каждым человеком смысла прочитанного, включая оценки эмоциональности содержания в текстах [9, 10, 15]. Третий – текстовая омонимия [18], а также сверхфразовые единства текста [9], что неизбежно вызывает повышенные тре-

бования к читателю. Четвертый – известный тезис «фактами можно доказать и опровергнуть все, что угодно», связанный с тем, что читатель не умеет мыслить системно или сталкивается с ложностью подхода, нечистоплотностью, а то и просто дезинформацией, не сразу распознаваемой [19, 20]. Частично это вызывается неправильно воспринятой интертекстуальностью текстов [10, 21].

## Анализ поставленной проблемы

Будем рассматривать научно-техническое направление общей проблематики работы со знаниями. Знания содержатся в неких книгах, документах, описаниях, стандартах, статьях и т.п. Всё это будем называть текстами в соответствии с общепринятым подходом в лингвистике. Специалистов, как правило, при решении текущих проблем, интересуют тексты, связанные определенным тематическим направлением (направлениями) и имеющие некоторые внутренние связи между собой, называемые сверхтекстами.

Многие авторы из направления создания ИС для обработки текстов уверенно ищут смысл аналитическими методами внутри текстов и синтезируют тексты, содержащие некий смысл [22–25]. Но ведь из психологии, а также лингвистики известно – процедура понимания человеком смысла очень непростая, разная по скорости и качеству у разных людей и весьма неоднозначна [10, 11]. Получается, что все намного сложнее и труднее, чем кажется, и путь для активного продвижения нужен какой-то совсем иной. В частности, для интенсивного поиска новых решений уже известны специальные технологии поиска (хотя частично и без применения вычислительной техники) – «мозговой шторм» [11] и ТРИЗ [13, 25].

Но ведь есть и традиционный подход. Это образование на основе разных современных образовательных технологий [26, 27]. Вот, например, точка зрения из [27]: «...объем накопленных человечеством знаний... огромен, и усвоение его каждым отдельным индивидом даже в течение всей жизни не представляется возможным...»; «Любое... научное знание преемственно, и в этом сила его продуктивных и предсказательных возможностей... Речь идет о концепции «учить «правильно»... – отправной пункт для дальнейшего разговора. ...Нельзя собственными руками провоцировать неверные взгляды и знания студентов...»; «...именно «усиление» смыслопоисковых компонентов является тем вектором, следование которому может способствовать сознательному усвоению учебного материала... возможности приме-



нить общие теоретические положения к... конкретным эффектам, явлениям и особенностям их протекания».

Эти проблемы из сферы образования можно свести к следующим [28]. Первая – уже упомянутая сатурация. Вторая – необходимость постоянно приближать результаты образовательного процесса к практическим нуждам. Третья – постоянное возникновение междисциплинарных направлений в науке и технике. Четвертая – необходимость самостоятельного обучения обучаемого.

Напрашивается идея работы над общим полем знаний, к чему педагоги уже тоже подошли [26]. Первым из удачных подходов в рамках ИИ было применение единых баз знаний (БЗ) для экспертных систем (ЭС) [5]. В единую БЗ сводятся необходимые знания, полученные моделированием интересующих частей из сверхтекста и от экспертов. Это удается для ограниченного числа задач с ограниченным объемом информации и знаний. Другой вариант – моделирование отдельных текстов моделями знаний, а потом вывод решений на их основе [29]. Выяснилось, что это задача NP-сложности с практически бесконечным перебором вариантов, а частичный вывод приводит к слишком приближенным решениям. Но многие вновь и вновь пытаются улучшить этот подход.

Компании IBM удалось продвинуться и создать мощную систему Watson с БЗ уже из 10 миллионов текстовых источников [23]. Как раз данная технология с рядом других показала тупиковость решения проблемы понимания на основе прямого пути применения методов ИИ [17, 24].

Но есть и совсем другой вариант этого направления работ, названный технологией прямого наложения знаний (ТПНЗ) [30–33]. Впервые подобное использовано в виртуальной астрономической обсерватории Д. Греем для обработки численных данных наблюдений за звездным небом [34]. Мы уже отмечали, что текстам присуще свойство – интертекстуальность, тем более научно-техническим, которые содержат основной массив теоретических и практических знаний [10, 21]. Эта особенность в большинстве ИС не используется, а в ИС с ТПНЗ является одной из основ.

### **ИС на основе ТПНЗ**

Промоделируем знания новым способом, поскольку известные, такие как производственные модели, семантические сети и другие [5], сложны в применении для поставленной задачи. Известно из лингвистики, что «наиболее существенной чертой предложения является его способность формировать и выражать мысль» [9, 10].

Метод описания знаний моделью, названной молингой, заключается в следующем [31, 33]. Предложения текста представляются кортежем с составлением словарей терминов (включая синонимы), отношений и т.д. Из предложений убирается эмоциональная окраска, они упрощаются с сохранением основных риторических отношений. Оценка достоверности молинг определяется в ви-

де факторов уверенности (ФУ), примененных в ЭС МУСIN. Получается БЗ из молинг. За счет идентификаторов при выдаче ответа может восстанавливаться близкий к исходному текст. С помощью молинг решается целый ряд лингвистических проблем [8, 9, 18], полностью или частично [33].

Молинги (с идентификаторами, определяющими их положение в исходном тексте) вводятся в БЗ ИС по порядку ввода исходных текстов. Если ядра молинг одинаковы или семантически одинаковы с тем ядром молинги, которая уже находится в БЗ ИС, то в ней делаются пометки (идентификаторы), из какого текста вводится. Повторение знаний, имеющих в БЗ, может повысить или понизить их достоверность в зависимости от нового ФУ (пометки дублированных знаний в виде набора идентификаторов сохраняются). А то, чего нет, – вводится и увеличивает объем БЗ [30–33].

В результате получаемая БЗ с ТПНЗ обладает рядом уникальных свойств по сравнению с БЗ на основе других моделей знаний [4, 30–33]:

- объем БЗ на основе молинг обычно значительно меньше;
- логический вывод (ЛВ) по БЗ на основе ТПНЗ получается намного быстрее, чем по БЗ из других моделей знаний (в общем случае) в силу ее меньшего объема;
- поскольку ядра молинг сохраняют грамматические свойства исходного текста и вводятся обдуманно по структуре текста (хотя несут декларативный характер), в основном последовательность слов в ядрах молинг соответствует закону Ципфа в исходных текстах. Это приводит к более быстрой и эффективной работе ЛВ;
- по той же причине для БЗ из молинг соблюдается «правило Караулова шести шагов» [10]. Оно приводит к тому, что для ЛВ по БЗ из молинг для поиска связей количество вариантов цепочек ограничено шестью терминами как промежуточными.

### **Элинг/АСУЗ/БАНЗ в режиме ТПНЗ и новые особенности понимания**

ИС с БЗ на основе ТПНЗ могут иметь следующие варианты:

- с массовым производством для индивидуального потребителя – интеллектуальная электронная книга, названная элингой [30–32];
- в индивидуальном варианте для отдельного предприятия – аналитическая система управления знаниями (АСУЗ) [31, 32];
- для использования массовым потребителем в виде библиотеки аналитического накопления знаний (БАНЗ) [4, 32];
- для преподавателей учебных заведений [28];
- для личного использования, ведения архивов, заметок и т.п. [35].

Элинги позволяют: заносить в них постепенно большое количество знаний; пользователю получать ответ сразу (почти со скоростью расчетных программных средств), без изучения технической

литературы, задавая вопросы элинге; приобретать их по низкой стоимости; работать в широкой предметной области; пользователю получать результаты на уровне лучших специалистов мира и выше.

В состав элинги входит программное обеспечение (ПО), реализующее машину вывода, БЗ и сервисные программы. БЗ включает словари терминов, отношений и др. (их эквивалентов), собственнo знания, содержащиеся в текстах в виде молинг, расчетные модели (реализованные в виде отдельных подпрограмм, ускоряющих работу), визуальные и графические образы.

В элинге роль ЛВ иная, чем в [5, 25–27], где ответы получаются автоматически в результате ЛВ или в результате диалога и ЛВ. В элинге используется двухэтапная система ЛВ и диалогово-ассоциативного поиска (ДАП) и все запускается в процессе диалога [30–32]. В других ИС подобное тоже кое-где начинает применяться, в частности в [25]. В ИС с ТПНЗ результаты ЛВ носят вспомогательный характер для ДАП. В диалоге с элингой пользователь сам выбирает полученные в процессе ЛВ подходящие ответы и сам периодически меняет режим работы. В процессе работы пользователь может включать режимы когезии (локальной связности текста) [10] или вывода исходных текстов (или их части). Рассмотрим поподробнее.

В ТРИЗ [13] и методе «мозгового штурма» [11] создается определенная среда для эффективной работы по поиску решений. В элинге/АСУЗ/БАНЗ [30–33] также создается специальная среда ускоренного и эффективного нахождения рациональных решений. Структура ДАП включает следующие этапы:

1) задание запроса пользователем по интересующему его вопросу;

2) элинга быстро выдает взаимосвязанный текст (блоками), который ЛВ может за заданный промежуток времени обеспечить, причем упорядоченный по уровню достоверности выводов;

3) пользователь анализирует получаемую информацию и, если необходимо, продолжает вывод (блоками) подготовленного результата или уточняет интересующие его детали, или делает новый запрос, т.е. переходит к п. 1;

4) когда пользователь убеждается, что он получил от системы требуемую информацию или удовлетворительного ответа получить невозможно, он заканчивает поиск.

Близко к подобному в восприятии решения некой проблемы высказался и Пойа [36] при прямом нахождении решения задачи/проблемы: «Найти решение задачи – ...установить связь между заранее дифференцированными объектами или идеями (...предпосылкой и заключением)... Иногда эту связь мы представляем... как наведение моста над глубокой пропастью, разделяющей две идеи, далеко отстоящие друг от друга. ...Связь представляется... как взаимосвязь аргументов, ...цепь – возможно, это будет длинная цепь – выводов. Вся цепь... не более прочна, чем ее слабое звено...»

Каждый раз при запросе отсутствуют гарантии того, что пользователь найдет необходимый ответ и каков он будет, но можно уверенно утверждать, что ЛПР разберется в интересующем его вопросе намного лучше. И одна из главных особенностей – быстро, поскольку не надо обращаться вначале ни в другие книги, ни в другие библиотеки, ни к другим специалистам, ни в другие отделы, ни в другие организации (конечно, при достаточной развитости элинги/АСУЗ/БАНЗ).

В результате элинга/АСУЗ/БАНЗ [4, 28, 30–33, 35] решает или помогает решать на новой основе практически все перечисленные выше проблемы.

1. Пользователь фактически сам с помощью элинги конструирует текст, несущий нужное ему решение с понятным ему смыслом.

2. Результат решения в элинге/АСУЗ/БАНЗ будет выглядеть близко к виду [37]. Будут и ответы при ЛВ, а к ним необходимые пояснения из текстов, что запросит пользователь, – ссылки на литературу, изображения, схемы, чертежи, таблицы, необходимые расчеты. И все это для тех вариантов, которые пользователь будет считать нужным сохранить для итогового результата.

3. Путь к решению проблемы с насыщенностью – применение ТПНЗ, прекрасно использующей ситуацию с интертекстуальностью.

4. Значительное продвижение в решении проблемы с нечеткостью ЕЯ – исходное полуавтоматическое моделирование текстов и знаний с помощью молинг и применением ТПНЗ.

5. Нахождение «правильных решений» – исходно используются достоверные источники знаний: законы, ГОСТы, учебники, патенты, специальная литература, отлаженные подпрограммы для расчетов, выстраивание ответов в ЛВ по степени понижения ФУ.

Элинга/АСУЗ/БАНЗ [4, 28, 30–33, 35] выступает для потребителя как «носитель знаний» – локальная библиотека знаний, с одной стороны, а с другой – как «интеллектуальный помощник» человека (ИПЧ). Создание ИПЧ – это достаточно давняя и полезная идея [38], но ее важность все более возрастает с усилением насыщенности, все нарастающим количеством ИТ-технологий вокруг человека и все прибывающим количеством роботов и робототехнических систем, с которыми человеку приходится то сотрудничать, то конкурировать.

За последний год была разработана методика, позволяющая определять эффективность элинги, ускоряющих решение определенных задач при серьезном повышении качества ответа в сравнении с традиционными программными средствами работы с текстами в «электронном виде» (АП-поиск). Проведенная серия экспериментов с участием студентов показала хорошие результаты [35]. Не проиграв по времени поиска, элинга в сравнении с АП-поиском сразу стала давать более качественные ответы.



## Заключение

Рассмотренный подход для ИС с ТПНЗ создает новый и весьма эффективный метод работы со знаниями. Попутно обеспечивает не только новые возможности для решения научно-технических задач в режиме ИПЧ и предоставляет новые подходы к решению сложных проблем понимания не только текстов, но главное – способы решения возникающих проблем. При этом создается новая база для развития по широкому спектру человеческих технологий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-37-90127).

## Литература

1. *Немировский Е.Л.* Большая книга о книге. М.: Время, 2010. 1088 с.
2. *Маклюэн М.* Галактика Гуттенберга. Становление человека печатающего. М.: Мир, 2005. 496 с.
3. *Уемов А.И.* Системный подход и общая теория систем. М.: Мысль, 1978. 272 с.
4. *Бронфельд Г.Б., Ломакин Д.В.* Информация и знания. Современный подход. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2020. 190 с.
5. *Гаврилова Т.А. и др.* Инженерия знаний. Модели и методы. СПб.: Лань, 2016. 324 с.
6. *Цурганова Е.А.* Герменевтика – наука о смысле текста // Вестник Российской академии наук. 1994. Т. 64, № 12. С. 1095–1099.
7. *Аверьянов Л.Я.* Контент-анализ. М.: Кнорус, 2009. 456 с.
8. *Соломоник А.Б.* Язык как знаковая система. М.: Либроком, 2016. 224 с.
9. *Диброва Е.И. и др.* Современный русский язык. Теория. Анализ языковых единиц. В 2 ч. М.: Академия, 2008.
10. *Лукин В.А.* Художественный текст: Основы лингвистической теории. Аналитический минимум. М.: Ось-89, 2009. 560 с.
11. *Тихомиров О.К.* Психология мышления. М.: Академия, 2007. 288 с.
12. *Пиаже Ж.* Избранные психологические труды. М.: Междунар. пед. академия, 1994. 680 с.
13. *Альтшуллер Г.С.* Творчество как точная наука. Петрозаводск: Скандинавия, 2004. 208 с.
14. *Брукс Ф.П., мл.* Проектирование процесса проектирования: записки компьютерного эксперта. М.: И.Д. Вильямс, 2013. 464 с.
15. *Поспелов Д.А.* Моделирование рассуждений. Опыт анализа мыслительных актов. М.: Радио и связь, 1989. 184 с.
16. *Ovchinnikova E.* Integration of World Knowledge for Natural Language Understanding. Atlantis Thinking Machines 3. Atlantis Press, 2012. 1–242 p.
17. *Ferrucci D. et al.* To Test Machine Comprehension, Start by Defining Comprehension // arXiv:2005.01525v1 [cs.CL]. 4 May 2020. 21 p.
18. *Лантеева О.А.* Речевые возможности текстовой омонимии. М.: Либроком, 2018. 414 с.
19. *Гринбергер М.* На пути к пониманию // Открытые системы. 2004. № 5. URL: <https://www.osp.ru/os/2004/05/184308>.
20. *Стивенс-Давидовиц С.* Все лгут. Поисквики, Big Data и Интернет знают о вас все. М.: Эксмо, 2018. 364 с.
21. *Пьеге-Гро Н.* Введение в теорию интертекстуальности. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 240 с.
22. *Ермаков А.Е.* Эксплицирование элементов смысла средствами синтаксического анализа-синтеза // Компьютерная лингвистика и интеллектуальные технологии: тр. Междунар. конференции «Диалог'2003». М.: Наука, 2003. С. 136–140.
23. *Хай Р.* Эпоха когнитивных систем: Принцип построения и работы IBM Watson // IBM. 2013. 15 с. URL: <http://www.olap.ru/home.asp?artId=2507>.
24. *Flender S.* The quest for artificial common sense. 14.12.2020. URL: <https://towardsdatascience.com/the-quest-for-artificial-common-sense-766af7fce292>.
25. *IHS Goldfire.* Accelerating Decisions. Powering Innovation. White Paper / IHS Inc. 2013. 7 p. URL: [https://ihsmarkit.com/pdf/IHS-Goldfire-Platform-Whitepaper\\_140823110915517432.pdf](https://ihsmarkit.com/pdf/IHS-Goldfire-Platform-Whitepaper_140823110915517432.pdf).
26. *Кудинов В.А.* Построение информационной образовательной среды вуза на основе технологий управления знаниями: дис. ... д. пед. наук. М.: ИСМО РАО, 2010.
27. *Попков В.А. и др.* Теория и практика высшего образования. М.: Юрайт, 2017. 342 с.
28. *Бронфельд Г.Б.* Возможности интеллектуальных электронных книг – элинг в образовательном процессе // Инновационные технологии в образовательной технологии: мат. Всерос. науч.-методич. конференции. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. С. 70–81.
29. *Тыгуз Э.Х.* Интеграция знаний // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. № 5. 1989. С. 3–13.
30. Пат. на изобретение № 2440610. Российская Федерация. МПК G06 N 5/00. Система для работы с интеллектуальной электронной книгой – элингой / Бронфельд Г.Б.; заявка 21.06.2010; опубл. 20.01.12. Бюл. № 2.
31. *Бронфельд Г.Б.* Основы искусственного интеллекта. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014. 253 с.
32. *Бронфельд Г.Б., Киров Д.И., Кондратьев В.В.* Прототип интеллектуальной электронной книги с использованием технологии прямого наложения знаний // Программные продукты и системы. 2019. № 3. С. 403–410.
33. *Бронфельд Г.Б., Киров Д.И.* Молинги – новая модель представления для работы со знаниями // Материалы VII Международной конференции «Знания-Онтологии-Теории (ЗОНТ-19)». Новосибирск, 2019. С. 73–82.
34. *Gray J. et al.* The World-Wide Telescope: an Archetype for Online Science // SACM. 2002. V. 45, № 11. P. 50–54.
35. *Киров Д.И., Бронфельд Г.Б.* Сравнительный анализ процесса поиска ответов по текстовому источнику и с помощью интеллектуальной электронной книги // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 1(83). С. 72–77.
36. *Поля Дж.* Математическое открытие (Решение задач: основные понятия, изучение и преподавание). М.: Наука, 1976. 448 с.
37. *Пример полного концепт-проекта / компания «Метод».* М., 2021. URL: <http://www.method.ru/production/novator/primersfull/>.
38. *Переверзев-Орлов В.С.* Советчик специалиста: опыт разработки партнерской системы. М.: Наука, 1990. 133 с.

# Метод автоматического детектирования перезапусков в пик-волновых разрядах большой длительности у крыс с абсансной эпилепсией

А.Ю. Долинина<sup>1</sup>, И.В. Сысоев<sup>1,3</sup>, М.В. Сысоева<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>3</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

В настоящее время эпилепсия является одним из самых распространенных расстройств нервной системы, оказывающих значительное влияние на качество жизни человека. К одной из форм эпилептической активности относится абсансная эпилепсия – особая форма кратковременных не конвульсивных приступов, происходящих с частой повторяемостью, с приостановкой текущей деятельности и наличием характерных билатерально-синхронных разрядов типа «пик-волна» в электроэнцефалограмме (ЭЭГ) с частотой около 3 Гц. В среднем длительность спонтанных разрядов составляет порядка 6 секунд [1]. Подобные пик-волновые разряды с частотой 6–8 Гц появляются у крыс с генетической предрасположенностью к абсансной эпилепсии, таких как крысы линии WAG/Rij (Wistar Albino Glaxo из Rijswijk) [2, 3]. Несмотря на разницу частотных показателей, частотно-временная структура спонтанных пик-волновых разрядов является одинаковой для человека и крысы [3, 4].

Таким образом, была поставлена задача разработать алгоритм для автоматического определения запусков и возможных перезапусков абсансных разрядов и провести апробацию данного метода на временных рядах локальных потенциалов мозга у крыс линии WAG/Rij – генетических моделей абсансной эпилепсии, выведенной в Рейсвейке путем селекции, с поведенческими и электрофизиологическими признаками заболевания.

При проведении исследования [1] четыре электрода были размещены на поверхности коры, один из которых в области лобной коры (FC), второй – в области теменной коры (PC); сигналы с этих электродов использовались в данной работе. Полученный сигнал ЭЭГ был отфильтрован (полоса пропускания: от 0,1 Гц до 100 Гц), оцифрован с частотой дискретизации 512 Гц и сохранен для последующего анализа системой Windaq (Инструменты DATAQ, Акрон, Огайо, США).

В данном исследовании [1] существовала большая контрольная группа крыс, получавших одну либо две инъекции по 2 мл/кг арахидного масла вместо препарата каннабиса. Именно эти животные были рассмотрены.

Для тестирования метода использовались данные 11 экспериментов контрольной группы. Исследуемые разряды для каждой из крыс отбирались с учетом их длительности, которая должна была составлять более 10 секунд. Всего были исследованы 203 разряда в 11 экспериментах.

На данный момент существует достаточное количество методов автоматизированного обна-

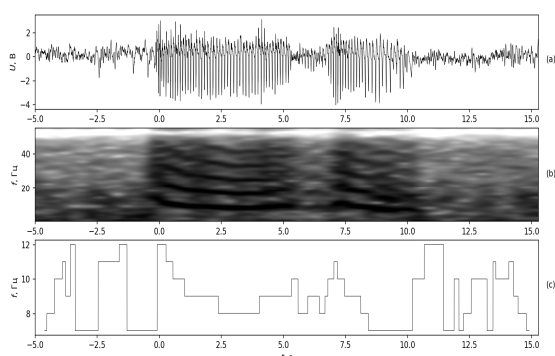
ружения абсансного приступа [5]. Разработанный нами алгоритм основан на анализе частотно-временной динамики приступа и не претендует на высокую чувствительность, так как преследует цель – показать, что перезапуски разрядов существуют и ничем не отличаются от начальных запусков с точки зрения динамики основной частоты, а значит, могут быть обусловлены теми же процессами.

Для реализации алгоритма использовалось оконное преобразование Фурье. Временное окно смещалось вдоль всего исследуемого сигнала с шагом по времени, равным шагу выборки,  $\Delta t = 1/512$  с. Также применялось окно Ханнинга, длина данного окна составила 1 с. С его помощью строилась спектрограмма.

Полученные спектрограммы анализировались не во всей полосе частот, а были ограничены интересующим нас диапазоном. Так как частота пик-волновых разрядов у крыс WAG/Rij составляет 7–12 Гц, то данный диапазон и был выбран. Помимо этого, были построены скелетоны, представляющие собой зависимость основной частоты приступа от его продолжительности. Скелетоны позволяют охарактеризовать динамику изменения частоты приступа в течение его длительности, визуально оценить частотную структуру приступа в указанном диапазоне, а также разработать алгоритм автоматического детектирования изменений основной частоты, аналогичных началу приступа.

Полученные скелетоны имели значительное число быстрых кратковременных бросков между частотами, затруднявших детектирование паттернов, свойственных началу приступа, поэтому производилась фильтрация (сглаживание) скелетона во временной области. Для этого весь временной ряд скелетонов был разбит на последовательные пары значений (длительность, частота), то есть для каждой встречающейся частоты в ходе исследуемого приступа вычислено время ее длительности. С помощью таких пар было произведено сглаживание частот с предшествующими, то есть значение частоты заменялось значением предыдущей частоты, если ее длительность оказывалась меньше 0,1 секунды. Это позволило избавиться от высокочастотных кратковременных скачков. Принятое при усреднении временное разрешение соответствовало порядку 1 колебания.

График (временной ряд сигнала локальных потенциалов мозга из отведения PC) пик-волнового разряда, его спектрограмма и её скелетон представлены на рис. 1.

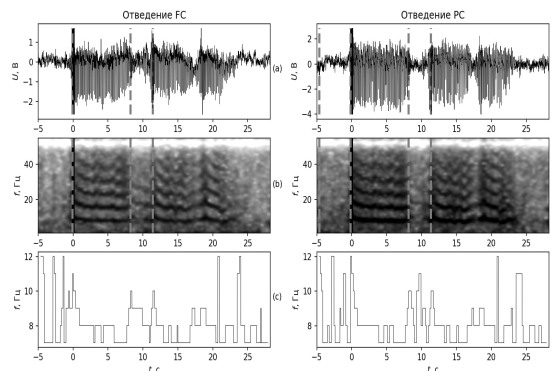


**Рис. 1.** Структура разряда длительностью около 10 секунд. Первый график сверху – временной ряд ЭЭГ (а), второй – спектрограмма пик-волнового разряда (b), третий – его скелетон (с). По горизонтальной оси указано время в секундах от начала разряда, по вертикальной для первого графика – напряжение в В, для второго и третьего – частота в Гц

Для автоматического определения перезапусков в электрическом разряде описанным алгоритмом было поставлено следующее условие: если частота на очередном интервале меньше предыдущей на 1 Гц и это выполняется минимум 3 раза подряд (то есть образуется условная лесенка из частот), то время начала предполагаемого перезапуска запоминается. Данное условие основано на принципе начала абсансного приступа, характеризующемся появлением основной частоты на спектре в диапазоне 7–12 Гц и дальнейшим резким его спадом. По итогу выполнения такого алгоритма получаются моменты времени, соответствующие моментам перезапусков разряда, если таковые были найдены.

Одна из организаций частотно-временной структуры разряда из лобного (FC) и теменного (PC) отведений длительностью около 23 с, полученная предложенным методом, представлена на рисунке 2. Построение графиков велось по разметке, сделанной энцефалографистом для работы [1] с пятисекундным отступом в начале и в конце приступа. На данном рисунке видно, что начало приступа, размеченное автоматически (первая серая штриховая вертикальная линия на верхнем (рис. 2, а, d) и среднем (рис. 2, b, e) графиках для обоих отведений), и начало приступа, размеченное энцефалографистом (черная вертикальная линия на тех же графиках), незначительно различаются. Ошибка по времени составила 0,1 с для лобной коры и 0,3 с для теменной. Алгоритмом было обнаружено два перезапуска как на FC, так и на PC – вторая и третья серые штриховые вертикальные линии на двух верхних (рис. 2, а, d) графиках. Автоматически определенное начало и второй перезапуск соответствуют визуальной оценке спектра частот данного приступа. Первый перезапуск, в свою очередь, визуально достаточно сложно установить, он соответствует началу низкоамплитудного временного интервала, но алгоритм его обнаруживает. Также при анализе спектров (рис. 2, b, e) можно сказать, что примерно на 18-й секунде визуально наблюдается скачок частоты, что может

быть интерпретировано как перезапуск, однако алгоритм его не фиксирует, поскольку имеют место только 3, а не 4 последовательные полочки частот, так как начальная частота ниже той, что была при запуске и двух обнаруженных перезапусках. Следует отметить, что переход к этой временной точке сопровождается плавным изменением частоты разряда, как хорошо видно по основной частоте и ее второй гармонике.



**Рис. 2.** Частотно-временная структура разряда длительностью около 23 секунд для лобного (FC) и теменного (PC) отведений коры головного мозга. Первый график сверху (а, d) – временной ряд ЭЭГ, второй (b, e) – спектрограмма пик-волнового разряда, третий (с, f) – его скелетон. Вертикальными черными линиями на временном ряде и спектрограмме обозначены моменты времени, соответствующие началу разряда, размеченному энцефалографистом, серыми штриховыми – моменты времени, соответствующие автоматически определенным перезапускам. По горизонтальной оси указано время в секундах, по вертикальной – частота в Гц. Ноль на оси абсцисс соответствует началу разряда на 2882,5056-й секунде записи

Представленный на рис. 2 случай относится к такому, когда автоматический метод детектирует начало разряда и перезапуски на обоих отведениях – PC и FC – одновременно. Разница в 0,1–0,3 с может быть объяснена различным уровнем сигнала в отведениях и тем, что разные отведения вовлекаются в эпилептиформную активность не совсем синхронно.

В результате анализа 203 разрядов в 11 двухканальных записях (теменная и лобная кора) у 8 животных перезапуски были выявлены примерно в четверти случаев. Общее количество разрядов с перезапусками в FC-отведении составило 54, в PC-отведении – 61. Всего по обоим отведениям одновременно было найдено 23 перезапуска, в том числе в 7 случаях были детектированы и запуск, и перезапуск разряда на обоих рассмотренных отведениях.

Чувствительность метода составила около 50%: по каналу FC было выявлено 105 приступов из 203, по каналу PC – 91. Для метода автоматического детектирования это явно недостаточно, но следует заметить, что мы специально старались завязать специфичность подхода в ущерб его чувствительности и наложили достаточно строгие ограничения на динамику частот.

Таким образом, результаты тестирования алгоритма подтвердили тот факт, что перезапуски в разрядах большой длительности существуют, и показали, что часть длинных разрядов в действительности являются вплотную сцепленными группами коротких разрядов, причем перезапуск, случающийся в середине разряда, ничем не отличается от начального запуска. Этот механизм можно рассматривать как дополнительный по отношению к механизмам поддержания. Также можно полагать, что данная методика может быть перенесена на исследование людей путем простого масштабирования частотных диапазонов, в которых выделяется основная частота разряда.

Понимание механизмов поддержания длительных абсансов крайне важно для моделирования. Перезапуски позволяют подтвердить наличие факторов, влияющих на поддержание длительной ритмической эпилептической активности. Это означает, что генерация длинных разрядов может осуществляться не только за счет особых механизмов, но и за счет того же механизма, что ответственен за запуск приступа. Учитывая это, моделирование разрядов должно быть скорректировано.

Также стоит отметить, что наличие различных механизмов генерирования длинных абсансов может объяснять то, что воздействия электрофизиологической природы, тестируемые на сегодняшний день для прекращения приступов, могут оказаться успешны в одних случаях и не результативны в других [6–8].

Работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-72-10030.

## Литература

1. *Van rijm C.M., Gaetani S., Santolini I., Badura A., Gabova A., Fu J., et al.* WAG/Rij rats show a reduced expression of CB1 receptors in thalamic nuclei and respond to the CB1 receptor agonist, R(+)WIN55,212-2, with a reduced incidence of spike-wave discharges // *Epilepsia*. 2010. V. 51(8). P. 1511–1521.
2. *Вольнова А.Б., Ленков Д.Н.* Абсансная эпилепсия: механизмы гиперсинхронизации нейронных ансамблей // *Медицинский академический журнал*. 2012. Т. 12, № 1. С. 7–8.
3. *Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.* Анализ электрической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии: прикладные аспекты нелинейной динамики // *Известия вузов. ПНД*. 2011. № 6. С. 174.
4. *Bosnyakova D., Gabova A., Zharikova A. et al.* Some peculiarities of time-frequency dynamics of spike-wave discharges in human and rats // *Clin. Neurophysiol*. 2007. V. 118. P. 1736–1743.
5. *van Luijteleaer Gilles, Lüttjohanna Annika, Makarov V.V., Maksimenko V.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E.* Methods of automated absence seizure detection, interference by stimulation, and possibilities for prediction in genetic absence model // *Journal of Neuroscience Methods*. 2016. V. 260. P. 144–158.
6. *Lüttjohann A., van Luijteleaer G.* Thalamic stimulation in absence epilepsy // *Epilepsy Research*. 2013. V. 106(1–2). P. 136–145.
7. *Nelson T.S., Suhr C.L., Freestone D.R., Lai A., Halliday A.J., McLean K.J., Burkitt A.N. et al.* Closed-loop seizure control with very high frequency electrical stimulation at seizure onset in the GAERS model of absence epilepsy // *Int. J. Neural Syst*. 2011. V. 21. P. 163–173.
8. *Saillet S., Gharbi S., Charvet G., Deransart C., Guillemaud R., Depaulis A. et al.* Neural adaptation to responsive stimulation: a comparison of auditory and deep brain stimulation in a rat model of absence epilepsy // *Brain Stimul*. 2013. V. 6. P. 241–247.

# Автоматический анализ выраженности индивидуальных особенностей в многоканальных сигналах ЭЭГ на базе рекуррентного анализа

Е.П. Емельянова<sup>1</sup>, А.Е. Руннова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
email: meretari@ya.ru

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

В настоящее время проводится все больше исследований по изучению динамики головного мозга при когнитивной деятельности людей. Для этих исследований существует необходимость в сборе данных, характеризующих работу головного мозга. На сегодняшний день существует множество методов, позволяющих получать сведения о работе мозга, среди которых наиболее популярными являются функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), компьютерная томография (КТ), магнито- и электроэнцефалография (МЭГ, ЭЭГ). Выбор метода должен основываться исходя из самого эксперимента. В исследованиях, описанных в статье, для изучения динамики мозга во время когнитивной деятельности людей, страдающих хронической мигренью, использовалась неинвазивная электроэнцефалография. Этот метод изучения динамики головного мозга является широко распространенным, так как он является достаточно простым в использовании и сравнительно недорогим.

Для выделения индивидуальных особенностей работы головного мозга испытуемых к полученным с помощью электроэнцефалографа данным необходимо применить математические методы обработки данных. Существует множество различных математических методов обработки данных, которые можно адаптировать для работы с данными ЭЭГ. Все существующие на сегодняшний день такие математические методы условно можно разделить на два больших класса: корреляционные и частотные методы. Корреляционные методы служат для изучения связей между сигналами [1], в то время как частотные методы служат для выделения основных частот колебаний и распределения энергии по частотам. Наиболее известными представителями частотных методов являются преобразования Фурье и вейвлет-анализ. Одним из представителей корреляционных методов является рекуррентный анализ [2], который использовался в данном исследовании.

Для выделения индивидуальных особенностей рекуррентный анализ применялся не для сравнения динамики между каналами, а для сравнения динамики между событиями. В ходе эксперимента 23 испытуемых проходили повторяющиеся когнитивные тесты. Необходимо было подсчитать число элементов рисунка и нажать кнопку, соответствующую четному или нечетному числу элементов. Далее с помощью рекуррентного анализа оценивалось, насколько повторяемым является реакция испытуемого на стимул в данном канале. Таким образом, применение рекуррентного анализа в данном случае немного похоже на выделение когнитивных вызванных потенциалов.

Рекуррентный анализ основывается на нескольких простых шагах. Первым шагом является построение рекуррентных диаграмм для каждого канала. Рекуррентные диаграммы являются одним из главных инструментов рекуррентного анализа и строятся по следующей схеме. Сначала строится рекуррентная матрица, элементы которой ищутся по формуле [3]

$$RP_{i,j} = \theta(\varepsilon - |x_i - x_j|). \quad (1)$$

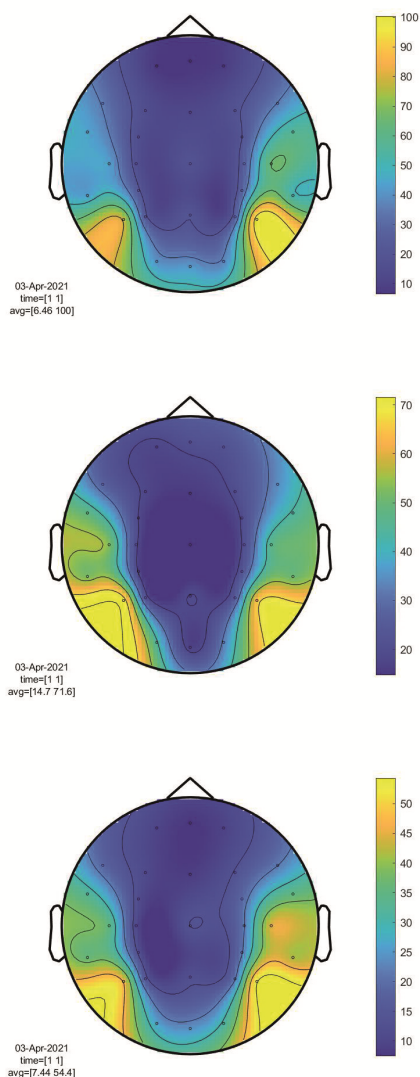
Здесь  $RP_{i,j}$  – элемент рекуррентной матрицы с номером  $i, j$ ;  $x_i$  и  $x_j$  – значения амплитуды ЭЭГ в моменты времени  $i$  и  $j$  соответственно;  $\theta$  – функция Хевисайда, которая равна 0, если аргумент отрицательный, и равна 1, если аргумент неотрицательный;  $\varepsilon$  – пороговое значение интервала, в котором точки считаются достаточно близкими. Таким образом, сравнивая все элементы ряда между собой, получаем матрицу, состоящую из нулей и единиц, где элементы равны нулю в случае, если значения амплитуд ЭЭГ в соответствующие моменты времени отличаются больше чем на  $\varepsilon$ , и единице, если значения амплитуд в соответствующие моменты времени достаточно близки. Суммируя все ненулевые элементы рекуррентной матрицы, можно получить рекуррентный показатель, показывающий, как много возвратов в сигнале.

Следующим шагом рекуррентного анализа является построение кросс-рекуррентной диаграммы. Кросс-рекуррентная матрица строится по формуле [4]

$$CRP_{i,j} = \theta(\varepsilon - |x_i - x_j|) \cdot \theta(\varepsilon - |y_i - y_j|). \quad (2)$$

Здесь  $CRP_{i,j}$  – элемент кросс-рекуррентной матрицы с номером  $i, j$ ;  $x_i$  и  $x_j$  – значения амплитуды одного сигнала в моменты времени  $i$  и  $j$  соответственно;  $y_i$  и  $y_j$  – значения амплитуды другого сигнала в моменты времени  $i$  и  $j$  соответственно. Суммируя все элементы кросс-рекуррентной матрицы, можно получить кросс-рекуррентный показатель [5]. Если сигналы похожи между собой или в них наблюдается появление паттернов, то величина кросс-рекуррентного показателя для таких сигналов будет возрастать [6]. Таким образом, имеем характеристику, позволяющую оценить отличие сигнала в определенном канале ЭЭГ испытуемого от усредненного по всем испытуемым. Кросс-рекуррентный анализ является нелинейным методом, что является достоинством при обработке экспериментальных данных ЭЭГ. Кросс-рекуррентные показатели были посчитаны для каждого канала каждого испытуемого из сравнения записей ЭЭГ при выполнении когнитивных тестов. С помощью модуля fieldtrip были визуализированы

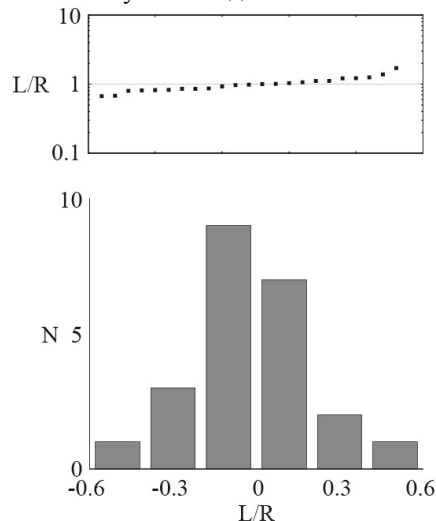
зированы результаты для всех испытуемых, среди которых наблюдались три типа мозговой активности: симметричное расположение максимумов кросс-рекуррентного показателя, преобладание правых и преобладание левых каналов. Примеры всех трех типов показаны на рисунке 1.



**Рис. 1.** Примеры распределения рекуррентного показателя по каналам для трех испытуемых

Для автоматизации процесса нахождения показателя симметричности значимых каналов было предложено суммировать кросс-рекуррентные показатели для левых и правых каналов и считать отношение суммы левых каналов к сумме правых каналов. Если это отношение меньше 1, то более важными являются правые каналы, если больше 1, то левые. Если отношение близко к 1, то каналы симметричны. На рисунке 2 показано отранжированное по возрастанию отношение суммы левых каналов к правым для всех испытуемых. Видно, что зависимость довольно гладкая в логарифмическом масштабе: число испытуемых, у которых важнее левые каналы, примерно равно числу испытуемых, у которых важнее правые каналы. Если

построить распределение логарифма отношения сумм кросс-рекуррентных показателей левых и правых каналов, то оно имеет вид, близкий к распределению Гаусса, хотя для строгого вывода статистики испытуемых недостаточно.



**Рис. 2.** Ранжированное по возрастанию отношение сумм кросс-рекуррентных показателей левых и правых каналов для всех испытуемых (вверху). Распределение отношения сумм кросс-рекуррентных показателей левых и правых каналов (внизу)

Таким образом, в настоящей работе показано, как с помощью рекуррентного анализа можно автоматизировать выделение индивидуальных особенностей в многоканальных сигналах ЭЭГ. Предложенный способ легко можно автоматизировать для оценки симметричности значимых каналов при оценке реакции на повторяющиеся стимулы в примере реакции на предъявление когнитивного теста.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-02-00752).

## Литература

1. Zbilut J.P., Giuliani A., Webber Jr C.L. Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification // *Phys. Lett. A*. 1998. V. 246, № 1/2. P. 122–128.
2. Eckmann J.-P., Kamphorst S.O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // *Europhys. Lett.* 1987. V. 4, № 9. P. 973–977.
3. Ramos A.M.T., Macau E.E.N., Goswami B. et al. Recurrence measure of conditional dependence and applications // *Phys. Rev. E*. 2017. V. 95. № 5. Art. 052206.
4. Marwan N., Romano M.C., Thiel M., Kurths J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // *Phys. Rep.* 2007. V. 438, № 5/6. P. 237–329.
5. Groth A. Visualization of coupling in time series by order recurrence plots // *Phys. Rev. E*. 2005. V. 438, № 5/6. P. 237–329.
6. Prichard D., Theiler J. Generalized redundancies for time series analysis // *Physica D*. 1995. V. 84, № 3/4. P. 476–493.

# Устойчивые характеристики колебательной структуры ЭЭГ-активности во время ночного сна у пациентов с нарушениями памяти

М.О. Журавлев<sup>1,2</sup>, А.А. Титова<sup>1</sup>, Д.С. Яковлев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
email: zhuravlevmo@gmail.com

Многие нейродегенеративные заболевания трудно диагностировать на ранних стадиях. Например, для ранней диагностики легкого когнитивного нарушения (*Mild Cognitive Impairment, MCI*) требуется широкий спектр тестов, чтобы отличить MCI-симптомы от нормальных последствий старения. В данной работе мы демонстрируем использование подхода количественных оценок колебательных паттернов на электроэнцефалограммах (ЭЭГ) здоровых взрослых пациентов и пациентов с когнитивными дисфункциями.

В нашем исследовании приняли участие добровольцы из числа пациентов Университетской клинической больницы имени С.Р. Миротворцева (Саратов, Российская Федерация), проходивших полисомнографическое исследование. Все субъекты исследования подписали информированное согласие на участие в клиническом исследовании, получили все необходимые объяснения по поводу исследования и согласились на последующую публикацию результатов исследования. Собранные экспериментальные данные обрабатывались с учетом конфиденциальности и анонимности участников исследования.

Критерии включения в работу были следующими: 1) мужчины или женщины в возрасте от 60 до 75 лет включительно, женщины считаются постклимактерическими; 2) психологическая готовность к приему информации, участник адекватно функционирует в когнитивном плане и в плане общения; 3) нет жалоб на недостаточный сон; 4) отсутствие нарушения сна (< 30 минут до засыпания, не более одного пробуждения за ночь > 15 минут) за последние 6 месяцев.

Критериями исключения были выбраны следующие: 1) любая инвалидность, которая может помешать участникам выполнить все требования исследования (например, слепота, глухота, серьезные языковые трудности); 2) оценка депрессии по шкале Бека > 13; 3) шкала HADS > 7 баллов; 4) индекс апноэ (АHI) и/или индекс периодических движений конечностей (PLM) > 5 и/или синдром беспокойных ног (RLS) в ночное время полисомнографии; 5) текущее медицинское или неврологическое состояние, которое может повлиять на когнитивные способности или производительность при оценке когнитивных функций (например, деменция, болезнь Хантингтона, болезнь Паркинсона, болезнь Лайма, шизофрения, биполярное расстройство, большая депрессия, активный эпилептический припадок, множественные черепно-мозговые травмы в анамнезе, алкоголь /

злоупотребление наркотиками или зависимость в настоящее время, или зависимость в течение последних двух лет); 7) запущенное, тяжелое прогрессирующее или нестабильное заболевание, которое может помешать оценке безопасности, переносимости исследования или подвергнуть участника особому риску (например, активный гепатит, ВИЧ-инфекция, тяжелая почечная недостаточность, тяжелая печеночная недостаточность, неконтролируемое или серьезное сердечное заболевание, включая недавний (в течение шести месяцев) инфаркт миокарда, застойная сердечная недостаточность (функциональный класс III–IV) или нестабильная стенокардия).

Каждый участник вел дневник сна ежедневно в течение недели. Все пациенты прошли оценку нейропсихологического статуса с помощью Монреальской когнитивной оценки (MoCA) [1], Госпитальной шкалы тревожности и депрессии (HADS), теста на сонливость и качество сна; а также тесты на семантическую и фонематическую осведомленность и память. Медицинское обследование проводилось врачами, сертифицированными в области неврологии.

Сравнительная оценка когнитивных функций участников исследования с помощью MoCA выявила существенное различие показателей, согласно которым пациенты были разделены на две группы. В первую группу вошли пациенты с оценкой MoCA < 27, во вторую группу вошли пациенты с оценкой MoCA > 27. По остальным оцениваемым критериям статистического разброса не было выявлено.

Эксперименты проводились ближе к вечеру в специально оборудованной полисомнографической лаборатории. Лаборатория представляла собой удобное звукоизолированное помещение. Пациенты приходили в клинику вечером со своей привычной ночной одеждой. После необходимой стандартной подготовки оборудования пациенты засыпали в удобное для них время.

Данные многоканальной поверхностной ЭЭГ собирали с помощью регистратора «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (ООО «Медиком МТД», Россия). Данные регистрировались с частотой дискретизации 250 Гц с использованием обычного монополярного метода регистрации с двумя опорными точками и  $N = 31$  электродом, расположенными по схеме 10-10 [2].

Математическая обработка данных ЭЭГ проводилась по всей записи ночного сна без разделения на стадии. Мы оценивали два параметра коле-

бательных паттернов – их длительность и количество в скользящем временном окне с длительностью 10 секунд. Были выявлены характеристики, на которых группы пациентов, разделенные по показателям MoCA, продемонстрировали статистические различия. При этом анализ гипнограмм полисомнографических записей не выявил статистически значимых отличий по продолжительности/количеству стадий, а также самой структуре сна.

В то же время хорошо известно, что автоматический расчет гипнограммы сна до сих пор практически нереализуем на практике и требует существенного участия и верификации опытным специалистом-сомнологом [3, 4]. Таким образом, представленный метод может иметь определенное значение как дополнительный подход диагностической помощи клиницисту – сомнологу и/или неврологу.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Саратовского государственного медицинского университета в рамках научного проекта No SSMU2021-005.

### Литература

1. *Nasreddine Z. S. et al.* The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment // *Journal of the American Geriatrics Society*. 2005. V. 53, № 4. P. 695–699.
2. *Klem G. H.* The ten-twenty electrode system of the international federation. The international federation of clinical neurophysiology // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. Suppl.* 1999. V. 52. P. 3–6.
3. *Magalang U. et al.* 251 Agreement and reliability of a new polysomnography sleep staging algorithm against multiple human scorers // *Sleep*. 2021. V. 44. P. A101.
4. *Roberts D. M. et al.* Detecting sleep using heart rate and motion data from multisensor consumer-grade wearables, relative to wrist actigraphy and polysomnography // *Sleep*. 2020. V. 43, № 7. P. zsa045.



# Нейроподобная фильтрация для выделения особых точек на изображениях крыльев пчел

И.А. Зимин<sup>1</sup>, А.А. Лебедев<sup>1</sup>, И.В. Нуйдель<sup>2</sup>, А.А. Тельных<sup>2</sup>, О.О. Чура<sup>1</sup>, В.Г. Яхно<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

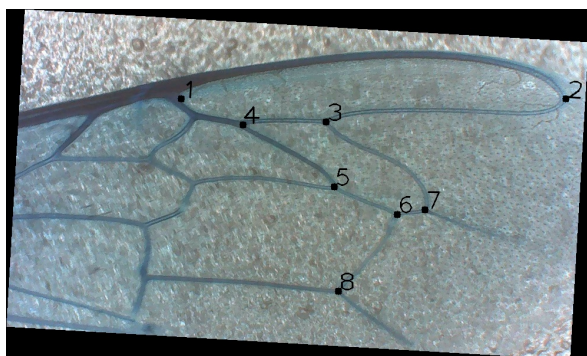
<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

## Введение

В России сосредоточен ценный генофонд пород и популяций пчел, сформировавшихся в различающихся природно-климатических условиях в результате эволюции, а позднее и под влиянием народной селекции [1]. Пчеловодство не только важное ремесло в мировом масштабе, позволяющее поддерживать популяцию пчел как основных опылителей некоторых видов растений на уровне, достаточном для предотвращения необратимых экосистемных изменений; также это одна из древнейших отраслей российского сельского хозяйства. Однако за годы аграрных реформ в России резко изменилась структура производства пчеловодческой продукции по категориям хозяйств, и основными ее производителями стали хозяйства населения: они производят почти 92 % меда, им принадлежит 91 % пчелиных семей [2].

В настоящее время в пчеловодстве как отрасли сельского хозяйства России, так, в частности, и при селекции пчел существует проблема классификации пчелиных семей по их принадлежности к определенной породе. Стимулом для решения подобных вопросов служит то, что межпородные помеси превосходят исходные породы по таким промышленным показателям, как медопродуктивность, на 10–20 кг. Селекционная работа с исходными породами ориентирована на увеличение этого показателя [1].

В наиболее широко распространенном морфометрическом методе исследования породы пчелы используются, например, характерные параметры жилкования крыльев. В методе классической геометрической морфометрии крыла на изображении размечается 8 особых точек (см. рисунок), по которым рассчитываются три индекса: кубитального, гантельного и дискоидального смещения. Подробное описание вычисления этих индексов приведено в [16, 17].



Особые точки на изображении крыла пчелы, используемые для вычисления морфометрических индексов в свободно распространяемой пользовательской программе

Существенная проблема при использовании морфометрических методов связана с трудоемкостью ручного выделения на изображениях оцифрованных препаратов передних крыльев рабочих пчел особых точек ветвления жилкования. Учитывая объем материала, подлежащий обработке для обеспечения статистической репрезентативности выборки (порядка нескольких десятков крыльев на семью), процесс ручной оцифровки оказывается весьма трудоемким. Один из путей решения этой проблемы – автоматизация разметки особых точек с помощью алгоритмов поиска объектов (особых точек) на изображениях.

В литературе встречаются упоминания программных продуктов, решающих подобную задачу, например программа DrawWing, автоматически предоставляющая численное описание крыла насекомого, то есть преобразующая изображение в список координат соединений жилок. DrawWing использует один из методов скелетизации изображения для последующей аппроксимации полученных линий сплайном из кривых Безье [7] и нахождения таким образом их пересечений и особых точек. Однако для стабильной работы данному продукту необходимы особые условия (разрешение  $2400 \times 2400$  и однотонность жилкования). Под однотонностью понимается одинаковая, с отклонениями в допустимых пределах, интенсивность пикселей изображения в указанной области.

Цель настоящей работы состоит в разработке метода автоматической разметки особых точек на изображениях, который при этом менее требователен к условиям работы, чем у существующих аналогов. На предоставляемых для обработки изображениях неоднородности яркости и контрастности в пространстве между прожилками оказываются такой же интенсивности, как и в местах контрастирования самих прожилков. Работа направлена на исследование средств и алгоритмов, которые позволяют убрать «шумовые» неоднородности и контрастировать только прожилки на изображениях крыльев.

## Метод фильтрации

Для контрастирования рисунка жилкования и уменьшения «шумовых» сигналов на изображениях предложено использовать динамические процессы преобразования входного изображения в однородной нейроподобной среде [6–9] – версия нейроподобного фильтра. В однородной нейроподобной среде каждый элемент связан с элементами в некоторой его окрестности функцией нелокальной пространственной связи (аналог рецептивных

полей в сетях естественных нейронов). Функции пространственной связи и характерные временные параметры среды можно подобрать таким образом, чтобы из рисунка на изображении можно было выделять линии заданных направлений. Использовались 8 слоев нейроноподобных сред, преобразующих обрабатываемое изображение в 8 упрощенных изображений с выделенными на них линиями под углами:  $0^\circ = 180^\circ$ ;  $22,5^\circ$ ;  $45^\circ$ ;  $67,5^\circ$ ;  $90^\circ$ ;  $112,5^\circ$ ;  $135^\circ$ ;  $157,5^\circ$ . Из этих упрощенных изображений были сконструированы кодовые модели для каждой особой точки крыла пчелы, используемой при вычислении индексов определения породности. На этом этапе имеется возможность настройки параметров функций пространственной связи и параметров уравнений нейроноподобной среды для лучшего соответствия ширине и длине прожилок в выбранной окрестности около каждой особой точки, чтобы повысить точность ее распознавания при сканировании. При поиске особых точек на изображениях применялся метод корреляционного сравнения с заранее подготовленными и обрабо-

танными нейроноподобной средой шаблонами – вырезанными из исходных изображений фрагментами заданного размера. Такой метод предполагается в дальнейшем оптимизировать [10] для снижения временных затрат.

### Результаты и обсуждение

Было рассмотрено несколько вариантов при конструировании кодовых моделей особых точек. Отбор лучшей кодовой модели проводился на основе критериев снижения возможных ошибок в процедуре распознавания точек. Например, уникальность созданных кодовых моделей может быть проверена в результате корреляционных сравнений модели для  $i$ -й особой точки с набором изображений, использованных при конструировании модели для  $j$ -й особой точки. Два примера результатов таких сравнений приведены в табл. 1 и 2.

Вычисление ошибок в прямых процедурах распознавания особых точек считается более адекватным критерием для выбора лучшей кодовой моде-

Таблица 1

Корреляционные сравнения для «кодовых моделей в заданной точке с вычитанием средней величины по изображению

		Примеры фрагментов из 20 изображений							
№ п/п		1	2	3	4	5	6	7	8
Кодовая модель	1	0,922 ± 0,03	0,222 ± 0,12	0,207 ± 0,18	0,233 ± 0,12	0,207 ± 0,14	0,149 ± 0,14	0,139 ± 0,27	0,268 ± 0,10
	2	0,227 ± 0,03	0,800 ± 0,10	0,088 ± 0,04	0,118 ± 0,07	0,172 ± 0,13	0,103 ± 0,13	0,140 ± 0,34	0,091 ± 0,13
	3	0,333 ± 0,06	0,125 ± 0,19	0,728 ± 0,13	0,609 ± 0,10	0,198 ± 0,16	0,242 ± 0,21	0,222 ± 0,26	0,185 ± 0,24
	4	0,331 ± 0,06	0,116 ± 0,19	0,481 ± 0,19	0,829 ± 0,08	0,215 ± 0,19	0,241 ± 0,15	0,205 ± 0,19	0,083 ± 0,26
	5	0,237 ± 0,02	0,186 ± 0,09	0,146 ± 0,14	0,187 ± 0,21	0,750 ± 0,09	0,070 ± 0,12	0,150 ± 0,18	0,030 ± 0,09
	6	0,261 ± 0,02	0,181 ± 0,14	0,291 ± 0,14	0,397 ± 0,06	0,122 ± 0,18	0,568 ± 0,18	0,177 ± 0,27	0,115 ± 0,26
	7	0,221 ± 0,02	0,190 ± 0,12	0,221 ± 0,08	0,299 ± 0,06	0,197 ± 0,13	0,154 ± 0,19	0,586 ± 0,17	0,136 ± 0,21
	8	0,352 ± 0,05	0,126 ± 0,09	0,216 ± 0,15	0,142 ± 0,17	0,098 ± 0,22	0,133 ± 0,19	0,250 ± 0,19	0,784 ± 0,08

Таблица 2

Корреляционные сравнения для «кодовых моделей усредненных по 9 точкам (заданная точка + 8 окружающих ее со сдвигом на 1 пиксель) с вычитанием средней величины по изображению

		Примеры фрагментов из 20 изображений							
№ п/п		1	2	3	4	5	6	7	8
Кодовая модель	1	0,680 ± 0,03	0,182 ± 0,07	0,351 ± 0,12	0,345 ± 0,12	0,224 ± 0,22	0,344 ± 0,19	0,282 ± 0,15	0,335 ± 0,17
	2	0,416 ± 0,04	0,508 ± 0,01	0,360 ± 0,20	0,375 ± 0,19	0,273 ± 0,22	0,159 ± 0,14	0,390 ± 0,17	0,265 ± 0,19
	3	0,348 ± 0,08	0,213 ± 0,11	0,477 ± 0,12	0,338 ± 0,15	0,221 ± 0,14	0,323 ± 0,12	0,338 ± 0,13	0,228 ± 0,16
	4	0,401 ± 0,04	0,327 ± 0,07	0,346 ± 0,15	0,440 ± 0,15	0,293 ± 0,25	0,337 ± 0,13	0,329 ± 0,13	0,241 ± 0,21
	5	0,240 ± 0,02	0,231 ± 0,19	0,299 ± 0,13	0,344 ± 0,17	0,341 ± 0,19	0,192 ± 0,13	0,221 ± 0,12	0,202 ± 0,17
	6	0,432 ± 0,03	0,219 ± 0,12	0,371 ± 0,11	0,353 ± 0,14	0,212 ± 0,23	0,436 ± 0,19	0,345 ± 0,15	0,246 ± 0,14
	7	0,361 ± 0,07	0,262 ± 0,09	0,365 ± 0,15	0,320 ± 0,20	0,193 ± 0,22	0,345 ± 0,16	0,429 ± 0,16	0,266 ± 0,13
	8	0,448 ± 0,03	0,232 ± 0,13	0,337 ± 0,14	0,333 ± 0,16	0,265 ± 0,16	0,316 ± 0,13	0,318 ± 0,15	0,421 ± 0,14

ли. Например, в тестовых измерениях ошибок при распознавании и разметки особых точек были получены следующие результаты.

■ Для вычисления моделей использовались изображения из одной серии препаратов крыльев (20 шт. – тренировочные изображения).

■ Алгоритм поиска корреляционным методом с использованием полученных моделей протестирован на двух сериях крыльев.

■ В первой серии использовались изображения, из которых получались модели (20 шт. – тестовые изображения).

• Особая точка 1 нашлась верно ( $\Delta R < 8 \text{ px}$ ) в **100 %** случаев.

• Особая точка 2 – в **95 %** случаев.

Алгоритм дальнейшего поиска зависит от верного нахождения точки 2, поэтому неудачные изображения в дальнейших подсчетах отбрасывались.

• Особая точка 3 – в **89,5 %** случаев.

• Особая точка 4 – в **100 %** случаев.

• Особая точка 5 – в **100 %** случаев.

• Особая точка 6 – в **89,5 %** случаев.

• Особая точка 7 – в **100 %** случаев.

• Особая точка 8 – в **79 %** случаев.

■ Во второй серии использовались изображения из другой партии (25 шт. – тестовые изображения, которые не использовались в процедуре получения моделей).

• Особая точка 1 нашлась верно ( $\Delta R < 8 \text{ px}$ ) в **96 %** случаев.

• Особая точка 2 – в **92 %** случаев.

Алгоритм дальнейшего поиска зависит от верного нахождения точки 2, поэтому неудачные изображения в дальнейших подсчетах отбрасывались.

• Особая точка 3 – в **74 %** случаев.

• Особая точка 4 – в **100 %** случаев.

• Особая точка 5 – в **100 %** случаев.

• Особая точка 6 – в **39 %** случаев.

• Особая точка 7 – в **78,3 %** случаев.

• Особая точка 8 – в **100 %** случаев.

Таким образом, продемонстрирована возможность использования динамического нейроноподобного фильтра для поиска и разметки особых точек на входных изображениях. В дальнейшем планируется разработка версий прикладной программы определения породной принадлежности

пчелиной семьи на основе описанного алгоритма поиска особых точек.

Предполагается, что в программе будут реализованы два режима: а) полуавтоматический и интерактивный, с возможностью исправлять выявленные пользователем ошибки и дообучением программных вычислений для повышения точности их работы; б) автоматический, более быстрый, но в котором отсутствует возможность внешней коррекции ошибок.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 14.Y26.31.0022).

## Литература

1. *Кривцов Н.И.* Перспективы использования генетического потенциала пчел и актуальные проблемы их селекции // Сборник научно-исследовательских работ по пчеловодству, Рыбное, 18 сентября 2016 года. Рыбное : ФГБНУ «НИИ пчеловодства», 2016. С. 31–35.

2. *Лебедев В.И., Прокофьева Л.В.* О проблемах формирования рынка продукции пчеловодства в России // Апитерапия сегодня. 2013. С. 143–147.

3. *Лебедев В.И., Билаш Н.Г.* Биология медоносной пчелы и пчелиной семьи: учебник для среднего профессионального образования. 3-е изд. М. : Юрайт, 2019.

4. *Конусова О.Л. и др.* Характеристика морфометрической изменчивости медоносных пчел *Apis mellifera* L., отличающихся вариантами локуса COI-COII мтДНК // Вестн. Том. гос. ун-та. Биология. 2016. № 1(33). С. 62–81.

5. *Tofliski A.* DrawWing, a program for numerical description of insect wings // Journal of Insect Science. 2004. V. 4, № 1.

6. *Мастеров А.В., Рабинович М.И., Толков В.Н., Яхно В.Г.* Исследование режимов взаимодействия автоволн и автоструктур в нейроподобных средах // Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях. Н. Новгород : ИПФ АН СССР, 1988. С. 89.

7. *Nuidel I.V., Yakhno V.G.* // Studia biophysica. 1989. V. 132, № 1/2. P. 137.

8. *Belliustin N.S., Kuznetsov S.O., Nuidel I.V., Yakhno V.G.* // Neurocomputing. 1991. V. 3. P. 231.

9. *Нуйдель И.В., Кузнецов С.О.* Использование однородных нейроноподобных сред для обработки изображений // Изв. вузов. Радиопизика. 1994. Т. 37, № 8. С. 1053–1061.

10. *Глумов Н.И. и др.* Метод быстрой корреляции с использованием тернарных шаблонов при распознавании объектов на изображениях // Компьютерная оптика. 2008. Т. 32, № 3.

# Переходные процессы в сетях осцилляторов Фитц-Хью – Нагумо как модель пик-волновых разрядов при абсансной эпилепсии

А.А. Капустников<sup>1,2</sup>, М.В. Сысоева<sup>1,3</sup>, И.В. Сысоев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

В настоящее время очень широко распространено использование нелинейной динамики для моделирования различного вида заболеваний, в частности связанных с головным мозгом. К таким заболеваниям относятся: болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера и различные виды эпилепсии. Современная классификация выделяет довольно много видов эпилепсии [1], от тяжелых форм, таких как височная эпилепсия, до мягких – абсансная эпилепсия [2]. Абсансная эпилепсия представляет собой спонтанное возникновение пик-волновых разрядов в мозге с частотой около 3 Гц у людей, преимущественно встречается у детей и выражается кратковременным отключением сознания без эпилептического припадка. Большинство видов эпилепсии является сетевым эффектом, и абсансная эпилепсия также относится к этой группе [3]. У людей и животных-моделей с абсансной эпилепсией нет значимых изменений биохимических параметров нейронов или концентрации нейромедиаторов, и при анализе экспериментальных данных наблюдались различия в связности между областями мозга у различных генетически однородных особей [4, 5], поэтому для возможности демонстрации данных эффектов в данной работе было принято решение рассмотреть все возможные матрицы связности, где матрица из [6] являлась бы типичным представителем полученного класса матриц. Это позволит в лучшей степени понять, например, почему у крыс линии WAG/Rij, которые генетически предрасположены к абсансной эпилепсии, болезнь протекает не в одно и то же время. Второй задачей являлось подтверждение предположения из [6] о том, что переход к длинным переходным процессам является свойством архитектуры сети, а не складывается в уравнениях моделей для отдельного узла. В данной работе рассматривается модель нейроосциллятора – модель Фитц-Хью – Нагумо.

Поскольку количество всех возможных матриц связности 14 нейронов очень велико, было принято решение сократить число этих матриц путем введения некоторых ограничений, которые позволили сократить количество этих матриц и получить полноценный класс с одинаковым количеством связей, расположением нейронов в сети и т. д.

Для начала введем обозначения клеток: PY – это пирамидальные нейроны, IN – это интернейрон, RE – это ретикулярные клетки и TC – таламокортикальные клетки, NT – нейрон, моделирующий тройничный нерв.

Правила, ограничивающие количество возможных соединений, следующие. Во-первых, в сети не должно быть нейронов, которые не имеют никаких соединений с другими нейронами, а также не должно быть нейронов либо только с входящими, либо только с исходящими связями. Во-вторых, количество связей во всей сети фиксировалось и принимало значение 34, как это было представлено в матрице из [6]. В-третьих, по физиологическим причинам следует рассмотреть три подсети, в которых были свои ограничения, поскольку ТС-клетки не могут воздействовать на себе подобные клетки. Но из-за того, что в данной системе из 14 нейронов интернейрон всего лишь один, то количество рассматриваемых подсетей уменьшается до двух (PY и RE). В-четвертых, чтобы упростить архитектуру связей, было решено свести к минимуму количество соединений в пирамидальной подсети, но следует отметить, что каждый PY-нейрон должен взаимодействовать с каждым другим PY-нейроном прямо или косвенно – через другие PY-нейроны – так как связи пирамид через интернейроны носят подавляющий характер, а также потому, что интернейроны могут взаимодействовать только с пространственно близкими пирамидами. Данные связи могут быть только в виде кольцевой архитектуры, и существует единственная возможная кольцевая архитектура  $PY1 \rightarrow PY2 \rightarrow PY3 \rightarrow PY4 \rightarrow PY1$ , поскольку перестановка нейронов местами предполагает простую перенумерацию нейронов. Аналогично была построена подсеть между клетками RE.

Воздействие клеток TC на другие клетки не является независимым. Каждая из них должна воздействовать на клетки всех трех других типов. Поэтому все они должны управлять единственной IN-клеткой. Чтобы предотвратить перевозбуждение PY-клеток, каждая TC-клетка может иметь только одно соединение вида  $TC \rightarrow PY$ , причем каждая клетка TC управляет своей собственной PY-клеткой, а соединение вида  $TC \rightarrow RE$  были взяты из [6] и зафиксированы для всех остальных матриц. Получается, за счет возможности перенумерации клеток TC существует только одна такая комбинация.

Так как интернейрон может воздействовать только на близлежащие пирамиды, были зафиксированы связи такие, как в [6], как и воздействие с PY-нейронов на IN (с условием ограничения воздействия на IN-нейрон со стороны PY-нейронов). NT-нейрон всегда воздействует на нейрон TC1. Все описанные выше 24 связи являются обязательными и присутствуют во всех матрицах

(рис. 1), составляющих класс. Остальные 10 связей были установлены для каждой матрицы с помощью перебора, который производился согласно известным законам таламокортикальной системы.

Исходя из этого число всех возможных матриц связности сокращается до 88 штук, и можно сказать, что был получен полноценный (в том смысле, что включающий все возможные варианты) класс, содержащий исходную матрицу из [6].

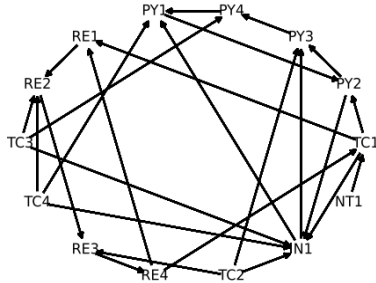


Рис. 1. Основные связи всего класса матриц связности

В данной работе рассматриваются ансамбли осцилляторов типа Фитц-Хью – Нагумо [7, 8], построенные с использованием одних и тех же матриц связей из предложенного класса.

Рассмотрим модель Фитц-Хью – Нагумо в записи

$$\varepsilon \frac{du_i}{dt} = u_i - \frac{u_i^3}{3} - v_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N k_{i,j} u_j, \quad (1)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = u_i + a_i,$$

где  $\varepsilon > 0$  – относительная скорость медленно изменяющихся ионных токов,  $k_{i,j}$  – коэффициент связи между  $i$ -м и  $j$ -м нейронами, параметр  $a_i$  определяет характеристики проводимости ионных каналов, является пороговым параметром системы, может принимать значения из отрезка  $a \in [0; 2]$ . Значениям  $a > 1$  соответствует возбудимый режим, при котором траектории системы стремятся к устойчивому состоянию равновесия, а значениям  $a < 1$  – автоколебательная динамика (устойчивый предельный цикл на фазовой плоскости), возникающая через суперкритическую бифуркацию Андронова – Хопфа при критическом значении  $a_{cr} = 1$ .

Все 88 моделей, построенные на основе класса матриц, были проанализированы на различных коэффициентах связи на интервале от 0,4 до 0,6.

Для начала рассмотрим результаты при  $k = 0,4$ . На данном коэффициенте связи будет рассмотрено 85 матриц (рис. 2), поскольку на трех матрицах из 88 система выходит на аттрактор, и после окончания внешнего воздействия колебания продолжают бесконечно долгое время (система уходит на бесконечную генерацию). На рис. 2 видно, что больше половины матриц связности при данном коэффициенте связи могут демонстрировать лишь одно остаточное колебание. Из этого можно сделать вывод, что большинство матриц класса могут показывать только малое  $v_{max}$ , что подтверждается и на более высоких ко-

эффициентах связи, что будет продемонстрировано далее.

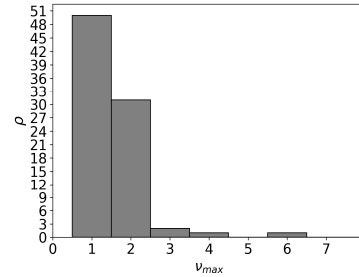


Рис. 2. Зависимость  $\rho(v_{max})$  – количество матриц связи  $\rho$ , имеющих соответствующее  $v_{max}$  (максимальное число остаточных колебаний) при  $k = 0,4$

При  $k = 0,4$  максимальное количество остаточных колебаний по всему классу показывает матрица № 30 (рис. 3), а именно 6.

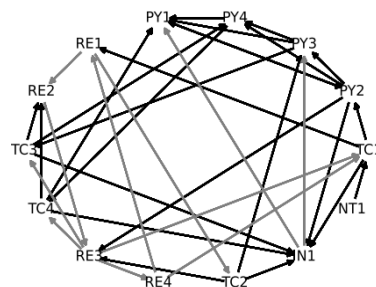


Рис. 3. Графы связи 14 нейронов для матрица № 30 для модели Фитц-Хью – Нагумо. Черным цветом обозначены положительные связи (для которых  $k_{i,j} > 0$ ), серым – отрицательные ( $k_{i,j} < 0$ )

Как и у матрицы из [6] зависимости  $v(t_{fin})$  ( $t_{fin}$  – время окончания воздействия), данная матрица имеет ярко выраженную периодическую структуру зависимости  $v(t_{fin})$ , что довольно четко видно на рис. 4.

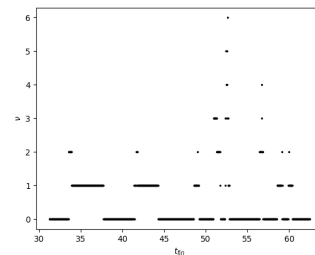
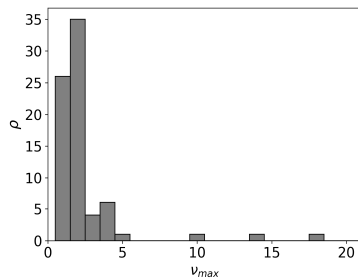


Рис. 4. Зависимость числа остаточных колебаний  $v$  ансамбля нейронов Фитц-Хью – Нагумо для матрицы № 30 от длительности (от конечного момента  $t_{fin}$  при фиксированном начальном) внешнего воздействия

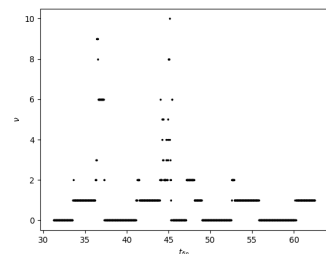
Теперь рассмотрим данный класс матриц (и матрицу № 30, в частности) при коэффициенте связи 0,5. Как и в предыдущем случае, при данном  $k$  существуют матрицы, которые показывают бесконечную генерацию, однако их стало больше, а именно 13 штук, поэтому далее рассматривается только 75 матриц из класса (рис. 5). Всё также наблюдается эффект, когда большее количество матриц способно только на малое  $v_{max}$ .

На представленном классе наблюдается увеличение числа остаточных колебаний при повышении коэффициента связи. Для демонстрации



**Рис. 5.** Зависимость  $\rho(v_{\max})$  – количество матриц связи  $\rho$ , имеющих соответствующее  $v_{\max}$  (максимальное число остаточных колебаний) при  $k = 0,5$

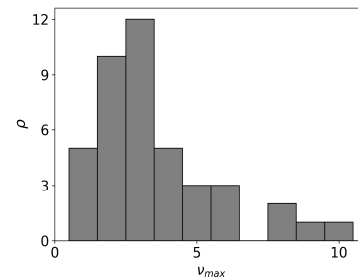
этого рассмотрим ту же матрицу № 30, только при  $k = 0,5$ . На рис. 6 видно, что теперь данная матрица способна демонстрировать на 4 остаточных колебания больше, чем при меньшем  $k$ . Но следует отметить, что теперь данная матрица не демонстрирует наибольшее  $v_{\max}$  среди всего класса: другая матрица, № 8, демонстрирует  $v = 18$ .



**Рис. 6.** Зависимость числа остаточных колебаний  $\nu$  модели Фитц-Хью – Нагумо для матрицы № 30 от длительности (конечного момента  $t_{fin}$  при фиксированном начальном) внешнего воздействия

Последним рассмотренным нами будет коэффициент связи, равный 0,6. Для данного  $k$  число матриц, которые бесконечно генерируют колебания (стоит отметить, что не только после окончания воздействия, но и непосредственно перед воздействием, т. е. внешний импульс уже никак не влияет на количество колебаний в системе), возросло еще сильнее, таких матриц насчитывается 46 штук, что превышает половину всего представленного класса (рис. 7), матрица № 30 также перешла в режим бесконечной генерации колебаний. Тот факт, что  $v_{\max}$  на данном графике ниже, чем на (рис. 5), обусловлен тем, что матрицы, которые показывали большое значение  $\nu$ , попросту перешли в бесконечную генерацию и далее не рассматривались. Исходя из всего выше сказанного можно сказать, что довольно большое количество матриц с увеличением коэффициента связи перешло от демонстрации одного остаточного колебания к бесконечной генерации колебаний в системе. Данное замечание неплохо соотносится с физиологичными представлениям об эпилепсии, ко-

гда изменение силы связи между нейронами может привести к их перевозбуждению, от перевозбуждения – к приступу, от приступа – к статусу. Также из этого можно убедиться в том, что архитектура сети влияет на то, будет ли возможна рассматриваемая авторами динамика системы на том или ином коэффициенте связи, поскольку на разных  $k$  наибольшее  $v_{\max}$  демонстрируют разные матрицы, а не одна и та же, что также довольно физиологичный эффект.



**Рис. 7.** Зависимость  $\rho(v_{\max})$  – количество матриц связи  $\rho$ , имеющих соответствующее  $v_{\max}$  (максимальное число остаточных колебаний) при  $k = 0,6$

Данная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-72-10030.

## Литература

1. Avakyan G.N., Blinov D.V., Lebedeva A.V., Burd S.G., Avakyan G.G. Epilepsy and paroxysmal conditions // Ilae classification of the epilepsies: the 2017 revision and update. 2017. V. 9(1). P. 6–25.
2. Вольнова А.Б., Ленков Д.Н. Абсансная эпилепсия: механизмы гиперсинхронизации нейронных ансамблей // Медицинский академический журнал. 2012. Т. 12, № 1. С. 7–19.
3. Suffczynski P., Kalitzin S., Lopes Da Silva F.H. Dynamics of non-convulsive epileptic phenomena modeled by a bistable neuronal network // Neuroscience. 2004. V. 126, № 2. P. 467–484.
4. Грищенко А.А., ван Рейн К.М., Сысоев И.В. Сравнительный анализ методов оценки ненаправленной связанности между внутричерепными отведениями ЭЭГ коры головного мозга крыс – моделей абсанской эпилепсии // Математическая биология и биоинформатика. 2017. Т. 12, № 62. С. 317–326.
5. Grishchenko A.A., Sysoeva M.V., Medvedeva T.M., van Rijn C.M., Bezruchko B.P., Sysoev I.V. Comparison of approaches to directed connectivity detection in application to spike-wave discharge study // Cybernetics and Physics. 2020. V. 9, № 2. P. 86–97.
6. Kapustnikov A.A., Sysoeva M.V., Sysoev I.V. Modeling Spike-Wave Discharges in the Brain with Small Neurooscillator Networks // Mathematical Biology and Bioinformatics. 2020. V. 16. P. 139–146.
7. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophysical Journal. 1961. V. 1. P. 445–466.
8. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An active pulse transmission line simulating nerve axon // Proceedings of the IRE. 1962. V. 50. P. 2061–2070.

# Моделирование динамики кровеносных сосудов

Б.Н. Клочков

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород  
email: klochkovbn@gmail.com

Кроме транспортной функции кровеносных сосудов, в них могут происходить волновые и колебательные процессы, статические изменения формы, параметры которых могут служить диагностике состояния сосудистой системы [1–8]. При этом существенным является построение адекватной математической модели распределенных движений крови в отдельном сосуде с учетом накопленного экспериментального материала. Кровеносные сосуды в экспериментальных условиях часто моделируются мягкими упругими трубками, через которые прокачивается жидкость. При превышении скоростью потока некоторого критического значения наблюдались осцилляции трубки. Имеют место сосредоточенные и распределенные гидродинамические модели течения крови в сосудах конечной длины.

Рассмотрим волновые и колебательные процессы в системе сосуд – кровь и исследуем их параметры. Используем математическую модель сосуда с учетом упругости сосудистого русла, скорости потока жидкости. Движение стенки сосуда описываем уравнениями тонкостенной оболочки [9]. Материал стенки считаем несжимаемым. Пренебрегаем продольными и угловыми смещениями элемента оболочки по сравнению с радиальными. Это связано с функциональной спецификой сосудов в живом организме. Сосуд достаточно жестко закреплен в ткани в осевом и азимутальном направлениях с целью экономии энергетических ресурсов. Практически перемещения стенки сосуда осуществляются лишь радиально под действием давления, что вполне достаточно для изменения внутреннего просвета сосуда, в частности для регуляции кровоснабжения тканей и органов. Уравнение движения элемента стенки в цилиндрических координатах имеет вид

$$\frac{Eh^3}{9} \left( \frac{\partial^4 R}{\partial x^4} + \frac{2}{R_0^2} \frac{\partial^4 R}{\partial x^2 \partial \theta^2} + \frac{1}{R_0^4} \frac{\partial^4 R}{\partial \theta^4} \right) + \frac{4EhR}{3R_0^2} = P - \rho h \frac{\partial^2 R}{\partial t^2}, \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $x$  – продольная,  $\theta$  – азимутальная координаты;  $E$  – модуль упругости материала стенки сосуда;  $h$  – толщина стенки;  $R$  – текущее изменение радиуса,  $R_0$  – недеформированный радиус;  $P$  – текущее изменение внутреннего давления;  $\rho$  – плотность материала стенки. В стенку сосуда могут входить гладкомышечные волокна, и параметр  $E$  может меняться в сторону как увеличения, так и уменьшения в зависимости от уровня активации волокон.

Уравнение для давления  $P$  в (1) следует из анализа гидродинамических уравнений [9]. Считаем кровь несжимаемой. Векторная скорость крови

$V = \nabla \phi + U$ , где  $\phi$  – потенциал скоростей,  $U$  – постоянная составляющая скорости. Используем уравнение Лапласа для потенциала скоростей, граничное условие непроницаемости на внутренней поверхности сосуда «стенка – кровь», интеграл Коши – Лагранжа ( $\rho_f$  – плотность крови). Решая уравнение Лапласа в виде  $\phi = f(r) \cdot \exp[i(\Omega t - kx - n\theta)]$ , где  $\Omega$  – частота,  $k$  – волновое число,  $n$  – номер азимутальной моды, получим модифицированное уравнение Бесселя для  $f(r)$ . Его ограниченное решение представляется в виде модифицированной функции Бесселя первого рода  $I_n$  с точностью до постоянного множителя:  $f(r) \sim I_n(kr)$ . Из условия непроницаемости на стенке следует выражение для давления, причем  $\alpha = kR_0$ ,  $(\cdot)$  – производная:

$$P = -\rho_f R_0 \Phi(\alpha, n) \left( \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + 2U \frac{\partial^2 R}{\partial x \partial t} + U^2 \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} \right), \quad (2)$$

$$\Phi(\alpha, n) = \frac{I_n(\alpha)}{\alpha I_n'(\alpha)}.$$

Анализ линейной стадии важен для биососудов, поскольку позволяет получить необходимые аналитические выражения и их зависимости от параметров рассматриваемой системы. Сделаем преобразования, переходя к безразмерным: частоте  $\zeta = \Omega R_0 / c$ , волновому числу  $\alpha = kR_0$  и другим параметрам. Из (1), (2) приходим к искомому дисперсионному уравнению, причем  $\rho \approx \rho_f$ :

$$[1 + \varepsilon(\alpha, n)] \zeta^2 - 2\varepsilon(\alpha, n) \alpha W \zeta + \varepsilon(\alpha, n) \alpha^2 W^2 - \delta(\alpha^2 + n^2)^2 - 1 = 0, \quad (3)$$

$$\varepsilon(\alpha, n) = \frac{1}{q} \Phi(\alpha, n), \quad q = \frac{h}{R_0}, \quad \delta = \frac{q^2}{12}, \quad (4)$$

$$W = \frac{U}{c}, \quad c = \sqrt{\frac{4E}{3\rho}}.$$

Решение квадратного уравнения (3) с выражениями (4) имеет два корня:

$$\zeta(\alpha, n) = \frac{\varepsilon(\alpha, n) \alpha W}{1 + \varepsilon(\alpha, n)} \pm \sqrt{N(\alpha, n)}, \quad (5)$$

$$N(\alpha, n) = -\frac{\varepsilon(\alpha, n) (\alpha W)^2}{[1 + \varepsilon(\alpha, n)]^2} + \frac{\delta(\alpha^2 + n^2)^2 + 1}{1 + \varepsilon(\alpha, n)}.$$

Полученные решения (5) описывают колебательные эффекты изменения просвета сосуда в распределенной модели упругого сосуда с кровью, подобной артерии, вене или другому сосуду, причем знак «+» соответствует устойчивой ветви, а знак «-» – неустойчивой. При возникновении неустойчивости ( $N < 0$ ) частота нарастающих колебаний  $\text{Re} \zeta$  линейно растет со скоростью потока  $W$ , что соответствует экспериментальным данным. При определенных условиях возможны неподвижные структуры. В качестве основного пара-



метра возьмем гидродинамический – скорость жидкости, размерная  $U$  или безразмерная  $W$ . Существуют по крайней мере две характерные скорости, приводящие к существенным эффектам.

Во-первых, получим выражение для критической скорости потока жидкости  $U_{cr}$  и частоты колебаний  $\Omega_{cr}$  при возникновении неустойчивости в трубке с жидкостью в случае  $N \leq 0$  при  $U \geq U_{cr}$ . Это проявление неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. При этом размерная критическая скорость потока  $U_{cr}$ , когда  $N = 0$ , равна

$$U_{cr}(\alpha, n) = c \sqrt{\frac{1 + \delta(n^2 + \alpha^2)^2}{\alpha^2 \varepsilon(\alpha, n)}} [1 + \varepsilon(\alpha, n)]. \quad (6)$$

Величина  $U_{cr}$  (6) монотонно растет с ростом продольного натяжения и окружного натяжения (при их учете), а также с ростом модуля упругости Юнга  $E$  и толщины стенки сосуда  $h$ . Безразмерная критическая скорость  $W_{cr}(\alpha, n)$  при пренебрежении продольным и окружным постоянными натяжениями, а также с учетом близких значений плотностей протекающей крови и материала стенки сосуда имеет упрощенный вид. Характерной особенностью этой зависимости является то, что  $W_{cr}(\alpha, n)$  определяется в основном только одним параметром  $q$  (относительная толщина стенки сосуда) и растет с ним, а она же размерная  $U_{cr}(\alpha, n)$  – еще и упругостью материала стенки  $E$ . В частном случае  $n = 0$  и  $\alpha \ll 1$  можно получить, что  $W_{cr}(\alpha, 0) \approx 1/\alpha$ . При  $U = U_{cr}$  имеем критическую частоту осцилляций в безразмерном виде:

$$\zeta_{cr}(\alpha, n) = \sqrt{\frac{12 + q^2(n^2 + \alpha^2)^2}{12}} \cdot \frac{\Phi(\alpha, n)}{q + \Phi(\alpha, n)}. \quad (7)$$

Минимальные частоты соответствуют длинам волн  $\lambda_{cr \min}^* \approx (2 \div 3)R_0$ . При  $n = 0$  и  $\alpha \ll 1$  получаем из (7), что  $\zeta_{cr}(\alpha, 0) \approx 1$ . Дисперсионные зависимости в комплексном виде можно представить как  $\zeta(\alpha, n) = \text{Re}\zeta(\alpha, n) + i\text{Im}\zeta(\alpha, n)$ . Неустойчивость имеет место в некотором диапазоне волновых чисел  $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$ , причем  $N(\alpha_{1,2}, n) = 0$ . При этом длина волны в этой области лежит в пределах  $\lambda_{1,2} \approx R_0 \div 1,4R_0$ . При увеличении номера моды  $n$  при фиксированных остальных параметрах характер зависимостей сохраняется, но область неустойчивости сужается, величины инкремента и декремента уменьшаются, причем в дальнейшем неустойчивая и затухающая мнимые ветви обращаются в нуль, а частотные действительные ветви становятся непересекающимися. Выражение для инкремента колебаний при  $W > W_{cr}$  имеет вид  $\text{In}_{cr}(\alpha, n) = \text{Im}[\zeta(\alpha, n)] = \sqrt{-N(\alpha, n)}$ , откуда видно, что  $\text{In}_{cr}(\alpha, n)$  растет монотонно с увеличением скорости потока крови  $W$ .

Во-вторых, рассмотрим случай нулевой скорости распространения волны или, что то же самое, случай нулевой частоты  $\zeta(\alpha, n) = 0$ . При  $C(\alpha, n) = 0$  остановившаяся волна, инкремент и декремент тоже нулевые, существует эффект статки. Здесь возможны: редкая, пространственно низкочастотная гофра для  $n \geq 1$  и частая, пространственно высокочастотная гофра для  $n \geq 0$ .

Получаем выражение для своеобразной безразмерной критической скорости структурирования  $W_{0cr}$  достижения стоячей гофры:

$$W_{0cr} = \sqrt{q \frac{12 + q^2(n^2 + \alpha^2)^2}{12\alpha^2 \Phi(\alpha, n)}}. \quad (8)$$

Критическая скорость кровотока  $W_{0cr}$  (8) для остановленных мод меньше, чем критическая скорость возникновения неустойчивости  $W_{cr}$  для неустойчивых мод:  $W_{cr} = W_{0cr} \sqrt{1 + \varepsilon(\alpha, n)}$  примерно в 2 раза по минимуму, то есть в реальности легче получить фиксированную извитость сосуда, чем его колебания. В приближении  $\alpha \ll 1$  и при  $n = 0$  получаем выражение для  $W_{0cr} \approx \sqrt{q/2}$ .

В-третьих, существует зависимость безразмерной фазовой скорости распространения возмущений от безразмерного волнового числа  $\alpha$  и номера моды  $n$ :

$$C(\alpha, n) = \text{Re}\zeta(\alpha, n)/\alpha. \quad (9)$$

Это обобщение частного случая формулы Юнга – Моенса – Кортвега для скорости пульсовой волны. При этом для реальной пульсовой волны ее длина сравнима с размером тела из-за достаточно низкой частоты сердечного пульса, однако для вынужденного волнового воздействия частоту можно увеличить. Из полученной формулы (9) в длинноволновом приближении  $\alpha \ll 1$  следует простое бездисперсионное выражение для размерной скорости распространения пульса при  $W = n = 0$ :

$$C_0 = \sqrt{2hE / (3R_0 \rho_f)}. \quad (10)$$

В нормальных условиях скорость течения крови в крупных артериях может достигать 1,5–2,9 м/с, а при некоторых патологиях может значительно увеличиваться [3–6]. Кроме того, существуют заболевания, связанные с уменьшением модуля Юнга материала стенки сосуда, что приводит к снижению критической скорости  $U_{cr}$ . Максимальная скорость крови в крупных венах может составлять 0,5 м/с. Частоты звуковых колебательных эффектов в системе сосуд – кровь составляют 25–500 Гц [3, 4]. Необходимо различать условия содержания сосуда, у сосудистых препаратов из-за их физико-химической обработки значения модуля упругости  $E$  могут существенно превышать соответствующие в живом действующем состоянии. В [3, 10, 11] приведены довольно низкие значения модуля упругости  $E \approx 10^2 \div 5 \times 10^4$  Н/м<sup>2</sup>. Вместе с этим существуют и данные значительно большие, чем приведенные. Характерные значения радиуса для рассматриваемых сосудов лежат в пределах  $(0,1 \div 1,2) \cdot 10^{-2}$  м. Критические скорости существенно падают с уменьшением  $q$ , минимальные значения составляют  $q \approx 0,02 \div 0,04$ . Измеренная скорость распространения пульсовой волны составляет 4–14 м/с для крупных артериальных сосудов и 1–2 м/с для крупных венозных сосудов [5, 6].

Оценки можно сделать при помощи полученных в настоящей статье формул и выражений для нулевой моды  $n = 0$  и нулевых продольных и ази-



мутальных напряжений, близких значений плотностей крови и водоподобной ткани стенки сосуда  $\rho \approx \rho_f \approx 1000 \text{ кг/м}^3$ . Так, при  $q = 0,02$ ,  $E = 4 \times 10^3 \text{ Н/м}^2$ ,  $R_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  минимальная критическая скорость неустойчивости равна  $U_{cr} = 0,28 \text{ м/с}$  согласно формуле (6), соответствующая частота  $f_{cr} = \Omega_{cr}/2\pi = 153 \text{ Гц}$  (7), минимальная критическая скорость структурирования  $U_{0cr} = 0,12 \text{ м/с}$  (8). Оценка скорости пульса в области устойчивости согласно формуле (9) при  $q = 0,04$ ,  $E = 5 \times 10^4 \text{ Н/м}^2$ ,  $U = 0,1 \text{ м/с}$ ,  $\alpha = 0,1$  равна  $C = 1,25 \text{ м/с}$ .

Сделанные оценки показывают правдоподобность результатов для венозных и артериальных сосудов в норме и при ряде патологий. Заметим, что в живом организме может происходить прорастание ткани, прорастающие деформации, и этот более медленный процесс может взаимодействовать с динамикой системы сосуд – кровь, «закреплять» статическую извитость. Когда сосуды прямые и чистые, то это хорошо с точки зрения кровоснабжения, а любой изгиб, извитость сосуда может привести к дальнейшим нарушениям гидродинамики и прочим патологическим процессам [12, 13]. Представлен линейный волновой подход к проблеме динамической биомеханики сосудов. Получены дисперсионные характеристики и выражение для частоты колебаний. Выведены формулы для двух критических скоростей тока крови: для структурирования сосуда и для его неустойчивости. Проведенные для крупных кровеносных сосудов оценки показывают возможность возникновения в них как статического и квазистатического режима (малые частоты), так и режима колебаний (относительно высокочастотные вибрации). Критические скорости кровотока могут достигаться для вен в обычных условиях, а для артерий – при функциональных или диагностических сдавливаниях, а также при патологии, характеризующейся значительно большей, чем в обычных условиях, скоростью течения крови либо меньшей упругостью сосуда.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИПФ РАН, проект № 0035-2019-0014.

### Литература

1. *Cancelli C., Pedley T.J.* A separated flow model for collapsible tube oscillations // *J. Fluid. Mech.* 1985. V. 157. P. 375–404.
2. *Gavriely N., Shee T.R., Cugell D.W., Grotberg J.B.* Flutter in flow limited collapsible tubes: a mechanism for generation of wheezes // *J. Appl. Physiol.* 1989. V. 66, no. 5. P. 2251–2261.
3. *Капо К., Педли Т., Шпромер Р., Сид У.* Механика кровообращения. М.: Мир, 1981. 642 с.
4. *Педли Т.* Гидродинамика крупных кровеносных сосудов. М.: Мир, 1983. 400 с.
5. Физиология кровообращения: физиология сосудистой системы. Руководство по физиологии. Л.: Наука, 1984. 656 с.
6. Физиология человека / Под ред. Р. Шмидта, Г. Тевса. М.: Мир, 1986. Т. 3. 288 с.
7. *Griffiths D.J.* Oscillations in the outflow from a collapsible tube // *Med. Biol. Engng. and Comput.* 1977. V. 15, № 4. P. 357–362.
8. *Brower R.W., Scholten C.* Experimental evidence on the mechanism for the instability of flow in collapsible vessels // *Med. Biol. Engng.* 1975. V. 13, № 6. P. 839–845.
9. *Вольмир А.С.* Оболочки в потоке жидкости и газа: задачи гидроупругости. М.: Наука, 1979. 320 с.
10. *Ohhashi T., Azuma T., Sakaguchi M.* Active and passive mechanical characteristics of bovine mesenteric lymphatics // *Amer. J. Physiol.* 1980. V. 239. P. H88–H95.
11. *Березовский В.А., Колотилов Н.Н.* Биофизические характеристики тканей человека: Справочник. Киев: Наук. думка, 1990. 224 с.
12. *Клочков Б.Н., Кузнецова Е.А.* Нелинейные режимы изменения формы упругой трубки с потоком жидкости в ней // *Изв. АН. Механика жидкости газа.* 2000. № 4. С. 46–55.
13. *Клочков Б.Н., Елисеева Ю.Ю., Шлягин П.А.* Распространение низкочастотных волн в биологических тканях и сосудах // *Акустический журнал.* 2009. Т. 55, № 4/5. С. 506–515.

# Формирование условного рефлекса на сегментной спайковой модели нейрона при моделировании поведенческих функций

А.М. Корсаков<sup>1</sup>, Л.А. Астапова<sup>1</sup>, А.В. Бахшиев<sup>2</sup>, Л.А. Станкевич<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центральный научно-исследовательский институт робототехники и технической кибернетики, г. Санкт-Петербург  
email: anton\_korsakov@mail.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого

## Введение

Нейроморфный подход, связанный с созданием математических моделей компонентов нервной системы и их аппаратных реализаций, в которых обработка сигналов адекватна биологическим прототипам, открывает новые возможности решения трудно формализуемых задач в технических системах.

Нейроморфные системы, построенные на базе простых спайковых нейронов, настраиваются на задачи (адаптируются) в основном путем параметрической настройки нейронов и сетей, т.е. изменением весов связей и порогов нейронов. Однако известно, что в нервной системе осуществляется не только параметрическая, но и структурная адаптация нейронов и сетей под решаемую задачу. Это вдохновило исследователей на создание спайковых динамически развивающихся нейронных сетей eSNN (Evolving Spiking Neural Network). Для большинства спайковых нейронных сетей создана традиционная стратегия развития, которая изменяет их структуру путем регулирования количества нейронов в процессе обучения, а также в динамическом режиме адаптирует сеть под задачу, настраивая веса нейронов в реальном времени [1, 2].

В качестве альтернативы такой стратегии развития в настоящей работе предлагается подход, предлагающий, помимо возможности динамического изменения структуры нейронной сети и связей между отдельными нейронами, и возможность структурной онлайн-перестройки самой модели нейрона. В рамках такого подхода рассматривается возможность реализации поведенческих функций в нейроморфных системах, построенных на спайковых нейронных сетях с сегментированными нейронами. Для этого используется специальный алгоритм структурной адаптации нейронов к входным паттернам импульсов. Работа алгоритмов демонстрируется на примере реализации простой поведенческой функции типа условного рефлекса.

## Схема формирования условного рефлекса

Согласно схеме формирования условного пищевого рефлекса у животных, предложенной в [3], условный раздражитель, например звонок, вызывает безусловно-рефлекторную ориентировочную реакцию. Звонок, являясь индифферентным раздражителем для пищевого рефлекса, пока не вызывает отделения слюны. В то же время безусловный раздражитель – пища – вызывает появление

слюноотделения. Таким образом, в коре (и стволе мозга) одновременно возникают очаги возбуждения, и если их одновременное возбуждение повторяется многократно, то между этими центрами происходит формирование пути проведения нервных импульсов, обеспечивающее замыкание условно-рефлекторной временной связи. После установления такой связи условный звуковой сигнал звонка приобретает для животного новое значение – сигнала или информации о предстоящем кормлении. С этого момента для вызова безусловного пищевого рефлекса, проявляющегося слюноотделением, становится достаточно подачи только условного раздражителя – включения звонка.

Подробно описанная в [4] модель нейрона с возможностью структурной адаптации позволяет нам предложить схему организации нейронной сети, которая воспроизводит условный рефлекс (рис. 1).

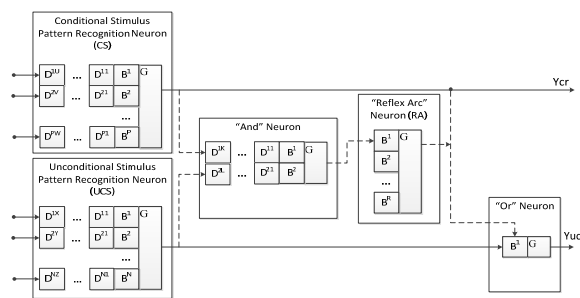


Рис. 1. Структурная схема нейронной сети, воспроизводящей условный рефлекс

На рисунке 1 CS – это нейрон с возможностью структурной адаптации, отвечающий условному раздражителю («условный раздражитель»); USC – нейрон с возможностью структурной адаптации, отвечающий безусловному раздражителю («безусловный раздражитель»); And – нейрон, реализующий функцию AND; RA – нейрон, формирующий условный рефлекс; Or – нейрон, реализующий функцию OR и отвечающий безусловному рефлексу.

Под паттерном импульсов X будем понимать совокупность сигналов, поступающих на входы модели нейрона (дендриты)  $D^{ij}$  за некоторый выбранный промежуток времени. Отдельный входной сигнал представляет собой одиночный импульс единичной амплитуды. Соответственно, отдельные сигналы в паттерне имеют одинаковую (единичную) амплитуду, но в общем случае различное время поступления на соответствующий вход модели нейрона. Предполагается, что за выбранный промежуток времени поступления пат-

терна на отдельном входе может быть зафиксировано не более одного входного импульса.

Выходной сигнал генерируется в низкопороговой зоне модели нейрона (генератор потенциала действия)  $G$  и представляет собой одиночный импульс либо серию импульсов единичной амплитуды, формируемых при превышении величиной потенциала некоторого порога. Само же значение потенциала внутри низкопороговой зоны нелинейно связано с суммой сигналов, пришедших на вход нейрона.

Для преодоления порога и генерации потенциала действия необходимо максимизировать сумму вкладов в потенциал внутри низкопороговой зоны от всех дендритов, что может быть достигнуто синхронизацией действия входных сигналов в нейроне. Эта задача решается путем добавления отдельных сегментов дендритов и добавлением синапсов на конечный сегмент дендрита.

Процедуру наращивания длины дендрита будем называть синхронизацией, тогда как процедуру добавления синапсов – нормализацией. Процессы синхронизации и нормализации для конкретного паттерна будем называть обучением модели нейрона данному паттерну импульсов. Генерацию потенциала действия при фиксированном паттерне импульсов и соответствующей ему конфигурации обученной модели нейрона будем называть распознаванием данного паттерна импульсов.

На момент начала работы системы из всех связей, изображенных на рисунке 1, создается лишь связь «UCR – Or», что постулирует изначальное существование безусловного рефлекса.

При старте системы происходит обучение моделей нейронов CR и UCR входным паттернам импульсов. По завершении процесса обучения формируются связи «CR – And» и «UCR – And», что соответствует моменту начала формирования рефлекторной дуги.

Нейрон And, состоящий из двух сегментов сомы  $V_i$ , обучается сигналам, поступающим от нейронов CR и UCR. Обучение возможно лишь до определенного предела. Если рассинхронизация входных сигналов больше заданного этим параметром порога, воздействие условного и безусловного раздражителей не считается одновременным и дальнейшее формирование рефлекторной дуги не происходит. В противном случае по окончании обучения нейрон And начинает генерировать выходные импульсные сигналы и создает связь «And – RA».

Нейрон RA представляет собой «большой» нейрон, т.е. количество сегментов его сомы значительно больше единицы. Конкретное значение размера «большого» нейрона выбирается пользователем и фактически означает скорость, с которой система сформирует условный рефлекс при одновременном воздействии условного и безусловного раздражителей. Нейрон And формирует связь лишь с одним из сегментов сомы «большого» нейрона, что является недостаточным для генерации моделью нейрона RA выходного импульсного сигнала. Однако, при поступлении на вход нейро-

на RA импульсов от нейрона And, происходит добавление синапсов на входной участок сомы, что повышает значение потенциала внутри низкопороговой зоны «большого» нейрона. Когда порог генерации потенциала действия в низкопороговой зоне нейрона оказывается превышенным, происходит генерация выходного импульса моделью нейрона RA, что приводит к формированию связи «CR – Or». Таким образом рефлекторная дуга замыкается.

Особенностью модели нейрона Or, состоящего лишь из одного сегмента сомы  $V^1$ , является наличие на этом сегменте двух синапсов, что позволяет данной модели реализовывать функцию OR. К одному из этих синапсов, как указывалось выше, произведено подключение связи от нейрона UCR еще при инициализации. Ко второму подключается связь от нейрона CR при начале генерации выходных импульсов нейроном RA. При формировании этой связи и при наличии возбуждения на входе нейрона CR модель нейрона Or оказывается способной генерировать выходные импульсы  $Y_{out}$  даже при отсутствии активности со стороны нейрона UCR.

Другими словами, для вызова безусловной реакции становится достаточно подачи только условного раздражителя, что и означает завершение формирования условного рефлекса.

### Эксперимент по формированию условного рефлекса

Создание моделей нейронных сетей с возможностью структурного реконфигурирования как самой сети, так и ее элементов, подразумевает необходимость обеспечить возможность описывать системы, в которых заранее не определена как топология связей между элементами системы, так и структурное описание и топология связей составных частей элементов системы. Для решения поставленной задачи использовалась программная платформа, описанная в [5].

На рис. 2 представлена исходная модель для воспроизведения условного рефлекса, реализованная в упомянутой выше программной платформе.

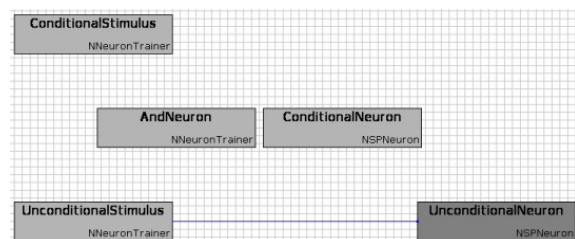
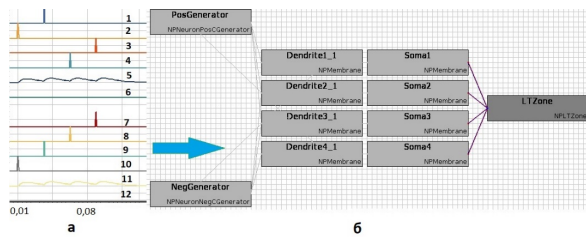


Рис. 2. Инициализированная модель формирования условного рефлекса

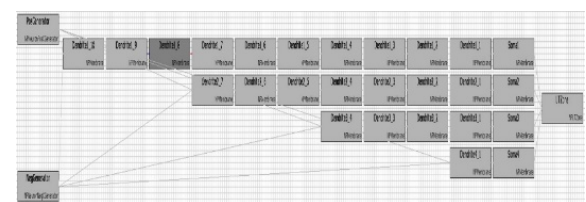
После начала работы системы установлена лишь одна связь, отражающая изначальное наличие безусловного рефлекса.

В результате процесса обучения нейронов CR и UCR (рис. 3) соответствующим им входным паттернам импульсов в определенный момент

времени эти нейроны начинают генерировать выходной сигнал. Этот момент соответствует окончанию обучения нейронов и образованию связей «CR – And» и «UCR – And». На рис. 4 представлена структурная организация обученного нейрона, отвечающего безусловному раздражителю.

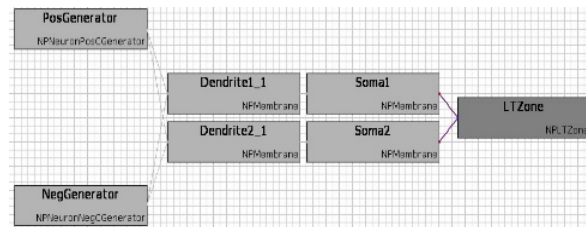


**Рис. 3.** Входные паттерны импульсов (а) и инициализированная модель нейрона с возможностью обучения (б)

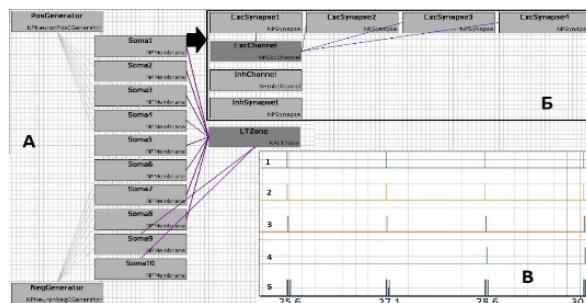


**Рис. 4.** Структурная организация обученного нейрона, отвечающего безусловному раздражителю

На следующем шаге начинается обучение нейрона, реализующего функцию And (рис. 5), после чего создается связь «And – RA» и нейрон RA начинает наращивать синапсы (рис. 6). В определенный момент нейрон RA начинает генерировать выходные импульсы, после чего формируется связь «CR – Or», замыкая рефлекторную дугу.



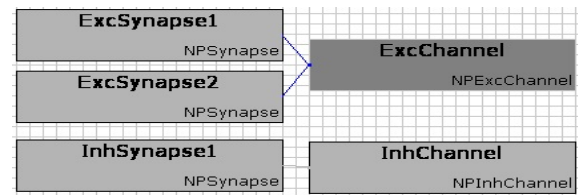
**Рис. 5.** Структурная организация нейрона, реализующего функцию «И»



**Рис. 6.** Обучение нейрона, формирующего условный рефлекс

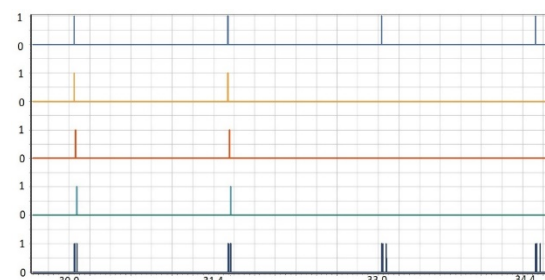
В момент инициализации системы формируется отвечающая безусловному рефлексу связь «UCR – Or», которая соединена с блоком ExcSynapse1 на рис. 7. После замыкания рефлек-

торной дуги связь «CR – Or» соединяется с блоком ExcSynapse2. Теперь достаточно активности на входе лишь одной из моделей синапсов для того, чтобы нейрон, реализующий функцию «ИЛИ», генерировал выходные импульсы.



**Рис. 7.** Структурная организация нейрона, реализующего функцию «ИЛИ»

Результат работы модели, сформировавшей условный рефлекс, приведен на рис. 8.



**Рис. 8.** Работа системы при активности лишь условного раздражителя

Графики на рис. 3 в порядке сверху вниз соответствуют: 1 – выходу нейрона, отвечающего условному раздражителю; 2 – выходу нейрона, отвечающего безусловному раздражителю; 3 – выходу нейрона, реализующего функцию «И»; 4 – выходу нейрона RA; 5 – выходу нейрона, реализующего функцию «ИЛИ» и отвечающего безусловному рефлексу.

Как видно из рисунка 8, отключение в какой-то момент времени безусловного раздражителя привело к прекращению активности выходов нейронов And и RA, однако выход нейрона Or продолжает быть активным.

Таким образом, условный рефлекс был сформирован.

### Заключение

Анализ существующих архитектур спайковых нейронных сетей показал, что в рамках структурной адаптации рассматриваются в основном вопросы регулирования количества нейронов и синапсов. В работе показано, что адаптивная способность спайковой нейронной сети может быть увеличена, если использовать модели нейронов с изменяемой структурой дендритного дерева и синаптического аппарата. Использование наряду с настройкой параметров нейронов и структуры нейронной сети дополнительной возможности настройки внутренней структуры самих нейронов, по мнению авторов этой работы, может значительно повысить эффективность реализации пове-

денческих функций в нейроморфных системах управления.

Представленные в работе алгоритмы структурной адаптации для решения задач распознавания паттернов импульсов, а также алгоритм формирования ассоциативных связей нейронной сети показали возможность реализации поведенческих функций в нейроморфных системах управления, построенных на спайковых нейронных сетях с сегментированными нейронами.

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00913-21-01 «Разработка и исследование новых архитектур реконфигурируемых растущих нейронных сетей, методов и алгоритмов их обучения».

## Литература

1. *Belatreche A., Maguire L.P., McGinnity M.* Advances in Design and Application of Spiking Neural Networks // *Soft Computing*. 2017. V. 3, № 11. P. 239–248.
2. *Dora S., Subramanian K., Suresh S., Sundararajan N.* Development of a Self-Regulating Evolving Spiking Neural Network for classification problem // *Neurocomputing*. 2016. V. 171. P. 1216–1229.
3. *Анохин П.К.* Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Медицина, 1968.
4. *Bakhshiev A.V., Gundelakh F.V.* Mathematical Model of the Impulses Transformation Processes in Natural Neurons for Biologically Inspired Control Systems Development // *CEUR-WS*. 2015. V. 1452. P. 1–12.
5. *Bakhshiev A.V., Fomin I.S., Gundelakh F.V., Demcheva A.A., Korsakov A.M.* Development of a Self-Regulating Evolving Spiking Neural Network for classification problem // *The architecture of a software platform for growing spiking neural networks simulator developing*. 2020. V. 1679. P. 042001.

# Сопоставление оценок сложности нейронной активности фактором Фано и методом DFA

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, г. Москва

## Введение

Оценка сложности нейронной активности, измеряемая по последовательности межспайковых интервалов, позволяет различать особенности вовлечения разных нейронов в выполнение поведенческой задачи [1–4] и также имеет парадигмальное значение [5]. Для оценки сложности нейронной активности используются расчет фактора Фано и фактора Аллана [1, 2] и метод расчета DFA (detrended fluctuation analysis) [3–4]. Эти методы не однозначны в своем применении, поскольку они предполагают построение соответствующей кривой и далее ее линейную аппроксимацию, что требует проверки формы самой кривой и выбора границы линейного участка. Угол наклона этой линейной аппроксимации и есть интересующий показатель, описывающий степень сложности нейронной активности, мера ее фрактальности.

В настоящей работе изучалась возможность оценить сложность активности нейронов по данным, полученным при экстраклеточной регистрации нейронной активности у свободно подвижных животных во время выполнения поведенческой задачи (данные предоставлены А.А. Созиновым, Институт психологии РАН). Всего проанализированы данные 210 нейронов. Они имеют разные длительности записей и количество спайков в них.

Также анализировалось влияние длины записи (количества спайков в записи) на рассматриваемые показатели сложности.

## Результаты

На рис. 1 показаны результаты расчета фактора Фано. Диапазон расчета определяется логарифмом числа спайков в записи, поэтому диапазон определения кривой больше для тех нейронов, у которых в записи больше спайков (длительность записи). Видно, что некое подобие линейности кривых можно наблюдать в интервале от 2 до 4,5. Поэтому показатель фрактальности далее оценивался в первом приближении как разность между значениями кривой в точках 4 и в точке 3.

На рис. 2 показаны значения показателя фрактальности фактора Фано, рассчитанные как угол наклона кривой рис. 1 между точками 3 и 4, в сопоставлении с количеством спайков в записи данного нейрона. Судя по отсутствию корреляции, расчет фактора Фано можно использовать и на коротких записях – меньше 4000 спайков.

На рис. 3 показана статистика показателя фрактальности для факторов Фано и фактора Аллана. Видно, что разнообразие значений для обоих методов примерно сходное и что нейроны примерно равномерно покрывают диапазон значений

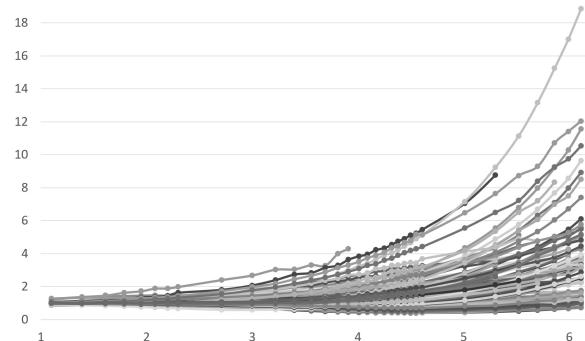


Рис. 1. Кривые расчета фактора Фано для 210 нейронов. По абсциссе – размер окна расчета, имеет меру логарифма числа межспайковых интервалов. По ординате – значение фактора Фано для этого размера окна. Одна линия – один нейрон

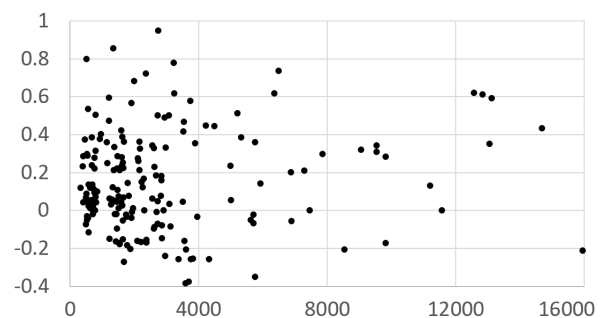


Рис. 2. Оценка влияния длины записи на значение фактора Фано для 210 нейронов. По горизонтали – число спайков в записи. По вертикали – значение  $(FF(4) - FF(3))/FF(3)$  (значения из рис. 1). Видно отсутствие корреляции с количеством спайков в записи

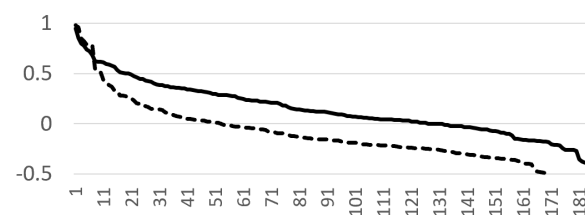
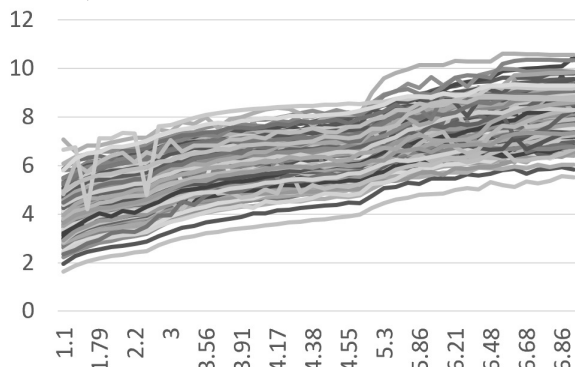


Рис. 3. Статистика угла наклона кривой фактора Фано (сплошная) и фактора Аллана (пунктир) как угла наклона между точками 3 и 4. Значения отсортированы по убыванию. В выборку вошли нейроны, для которых значение в точке 4 определено (т.е. имеющие достаточное количество спайков в записи): 183 нейрона для фактора Фано и 170 нейронов для фактора Аллана

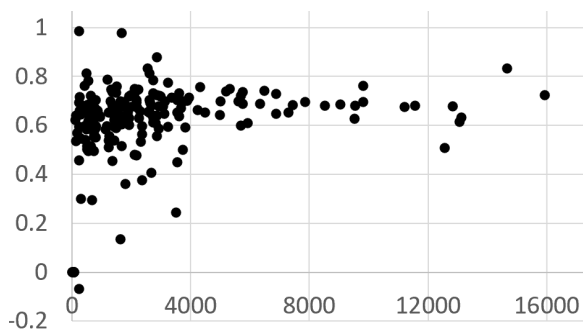
показателя, лишь на концах интервала выделяется небольшая группа нейронов.

На рис. 4 показаны результаты расчета по методу DFA. Диапазон расчета по оси абсцисс определяется логарифмом числа спайков в записи. В отличие от кривой фактора Фано (рис. 1) здесь кривые ближе к линейным и угол наклона представляется более сходным у разных нейронов. На рис. 5 показана статистика углов наклона кривой

DFA, рассчитанная как угол наклона линейной аппроксимацией от позиции абсциссы 1,1 до 4,5 на рис. 4. Видно отсутствие корреляции показателя фрактальности DFA с количеством спайков в записи и снижение его дисперсии для нейронов, имеющих более 4000 спайков.



**Рис. 4.** Кривые DFA для нейронов, имеющих более 1000 спайков (137 нейронов). Одна линия – один нейрон

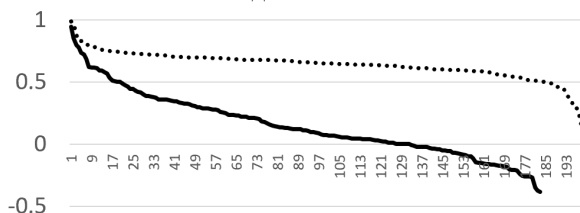


**Рис. 5.** Статистика фрактального показателя DFA для 210 нейронов в сопоставлении с числом спайков в записи (по горизонтали). Одна точка – один нейрон. Значения близкие к началу координат – у нейронов, имеющих слишком мало спайков для расчета. Видно снижение дисперсии показателя при объеме записи более 4000

По полученной статистике оценок фактора Фано и DFA можно видеть, что DFA более валиден для записей, имеющих не менее 4000 спайков, а фактор Фано применим и на меньших.

При сравнении рис. 2 и 5 видно, что фактор Фано дает большее разнообразие значений, чем показатель DFA. Более наглядно это видно по рис. 6, на котором сопоставлены статистики этих показателей по одной выборке нейронов: значения

показателя фрактальности (угол наклона кривой DFA) мало отличаются для большинства нейронов (лежат в интервале 0,5–0,8), в то время как значения угла наклона кривой фактора Фано плавно меняются в большем диапазоне значений.



**Рис. 6.** Статистика фрактальных показателей по методу фактора Фано (сплошная, 184 нейрона) и по DFA (пунктир, 200 нейронов). Видно большее разнообразие значений, рассчитанных через фактор Фано

## Выводы

Хотя оба показателя описывают сложность активности нейрона, оба используются для оценки фрактальности распределения межспайковых интервалов [1–5], они, по-видимому, оценивают содержательно разные аспекты сложности.

Работа выполнена по государственному заданию ФАНО № 0138-2021-0002.

## Литература

1. Дымов А.Б. Использование факторов Фано и Аллана для анализа свойств спайковой последовательности нейронов слуховой системы // Тр. 11-й Всерос. научно-технической конф. «Нейроинформатика-2009». М.: МИФИ, 2009. Ч. 1. С. 257–263.
2. Teich M.C. et al. Fractal Character of the Neural Spike Train in the Visual System of the Cat // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. V. 14. P. 529–546.
3. Bhattacharya J. et al. Long-range temporal correlations in the spontaneous spiking of neurons in the hippocampal-amygdala complex of humans // Neuroscience. 2005. V. 131. P. 547–555.
4. Hardstone R. et al. Detrended fluctuation analysis: a scale-free view on neuronal oscillations // Front Physiol. 2012. Vol. 3. P. 450.
5. Крылов А.К. Нелинейные и фрактальные свойства нейронной активности – следствия для моделирования // Материалы XV Международной конференции по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. Т. 1. С. 105–108.



# Оценка сложности нейронной активности методом условной энтропии ее символической динамики

А.К. Крылов

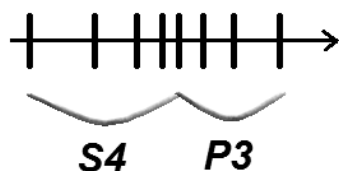
Институт психологии РАН, г. Москва

## Введение

Оценка сложности нейронной активности представляет теоретический и практический интерес – позволяет оценивать изменения сложности активности нейрона в различных поведенческих актах и оценивать различия между разными нейронами.

Поскольку спайковая активность нейронов математически аналогична пульсовому ритму сердца, можно рассмотреть возможность использования для анализа нейронной активности методы, разработанные для анализа пульса. Один из таких методов основан на предложенном С.Л. Загускиным [1] дроблении ритма сердца на фазы преобладания симпатического или парасимпатического тонусов. Фаза преобладания симпатического тонуса (S) характеризуется учащением пульса и детектируется как последовательное уменьшение межпульсовых интервалов (первая фаза на рис. 1). Фаза преобладания парасимпатического тонуса (P) характеризуется уменьшением пульса и детектируется как последовательное увеличение межпульсовых интервалов (вторая фаза на рис. 1). На основе этого подхода Ю.В. Гуров разработал 25-символьный метод кодирования пульса [2, 3]. Этот метод не делает различий между фазами S и P, основан на кодировании пар соседних фаз, каждая из которых содержит от 1 до 5 событий, что дает алфавит  $5 \cdot 5 = 25$  символов. Этот метод позволяет обнаруживать кардиологические заболевания [2, 3], они характеризуются снижением сложности ритма, снижением разнообразия последовательности символов.

Такой подход к кодированию активности, с одной стороны, представляется избыточным, поскольку две соседние фазы кодируются одной буквой, в результате чего алфавит вырастает с 5 символов до 25, с другой стороны, не учитывает различия между фазами S и P: например, S1P3 и P1S3 кодируются одним и тем же символом L.



**Рис. 1.** Пример кодировки ритма сердца или нейронной активности. По горизонтальной оси – время. Вертикальные палочки – моменты спайков или удары пульса. Межпульсовые или межспайковые интервалы соответствуют промежуткам между ними. Показано учащение активности, выражающееся в последовательном уменьшении 4 интервалов и закодированное символом S4; затем разрежение активности, выражающееся в последовательном увеличении 3 интервалов и закодированное символом P3

## Методика

Нами предложен 10-символьный способ кодирования межпульсовых и межспайковых интервалов: символом S обозначим фазу преобладания симпатического тонуса (сокращение интервалов), символом P обозначим фазу преобладания парасимпатического тонуса (увеличение интервалов) и цифрой запишем количество интервалов в фазе – от 1 до 5 (рис. 1). Если в одной фазе оказывается более 5 последовательных интервалов, то оставляем в кодировке цифру 5, так как такие случаи крайне редки (аналогично методу Ю.В. Гурова). Получается алфавит из 10 символов: {S1, S2, S3, S4, S5, P1, P2, P3, P4, P5}. Вся запись активности нейрона или сердечного ритма таким методом кодирования будет преобразована в последовательность символов из 10-символьного алфавита [4, 5]. Например, последовательность из 8 спайков на рис. 1 будет преобразована в слово из двух символов: S4P3. Отметим, что фазы S и P обязательно чередуются (не может быть, например, S1S2, поскольку они объединятся в S3; а P2P4 объединятся в P5).

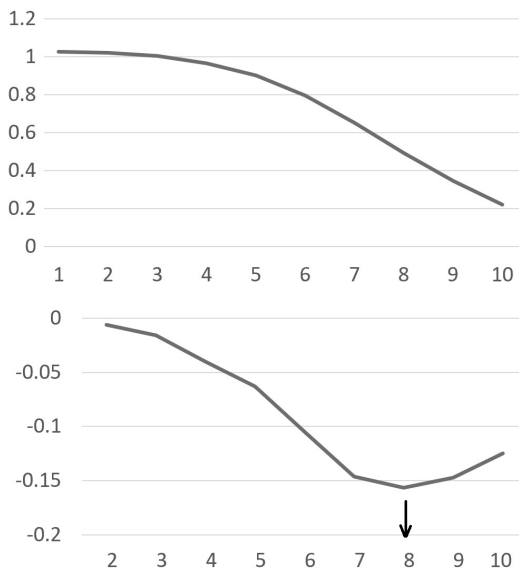
Вся запись активности нейрона преобразуется из последовательности межспайковых интервалов в последовательность символов, отражающих фазы повышения (S) или снижения (P) активности. Для оценки сложности нейронной активности рассмотрим возможность использовать расчет условной энтропии последовательности символов определенной длины – один из методов оценки сложности символической динамики, предложенный Ю.В. Гуровым [2, 3] для анализа ритма сердца, но применим его к нашему 10-символьному методу кодирования и рассмотрим на данных по нейронной активности. Расчет условной энтропии проводился аналогично [2, 3] по формуле

$$H(n) = - \sum_{i_1=1}^5 P_{i_1} \sum_{i_{n-1}=1}^5 P_{i_1 \dots i_{n-1}} \sum_{i_n=1}^5 P_{i_1 \dots i_n} * \log (P_{i_1 \dots i_n}).$$

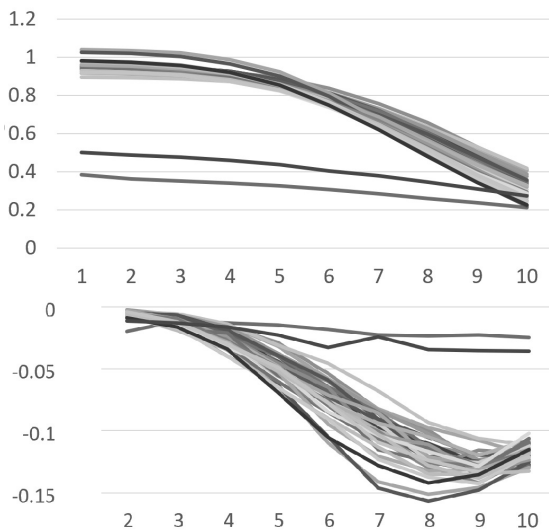
Здесь  $P_{i_1 \dots i_n}$  – условная вероятность появления последнего символа  $i_n$  после обнаружения строки  $i_1, \dots, i_{n-1}$ :  $P(i_n | i_1, \dots, i_{n-1})$ .

Данные нейронной активности получены при экстраклеточной регистрации нейронной активности у свободно подвижных животных во время выполнения поведенческой задачи (данные предоставлены А.А. Созиновым, Институт психологии РАН). Всего проанализированы данные 210 нейронов. Они имеют разные длительности записей и количество спайков в них.





**Рис. 2.** Пример результатов расчета для одного нейрона. *Вверху* – условная энтропия цепочек символов; *внизу* – разница текущей величины и предшествующей. По горизонтали – длина цепочки. По вертикали – значение условной энтропии (*вверху*) и ее разницы (*внизу*). Пик спада условной энтропии достигается при длине цепочки 8 символов (точка экстремума, показана стрелкой)



**Рис. 3.** Результаты расчета для 32 нейронов, имеющих более 3000 спайков в записи. *Вверху* – условная энтропия цепочек символов; *внизу* – разница текущей величины и предшествующей. По горизонтали – длина цепочки. По вертикали – значение условной энтропии (*вверху*), и ее разницы (*внизу*). Динамика сходная, за исключением двух нейронов

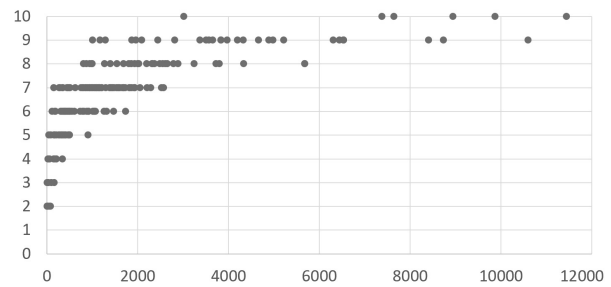
### Результаты

На рис. 2 (*вверху*) показан пример результатов расчета для одного нейрона – для условной энтропии характерен обратный S-образный вид кривой. Постепенно снижение условной энтропии с ростом длины цепочки символов означает снижение разнообразия последующего символа при учете предшествующей цепочки символов, т.е. чем длиннее учитываемая цепочка символов, тем более точно она предсказывает следующий символ.

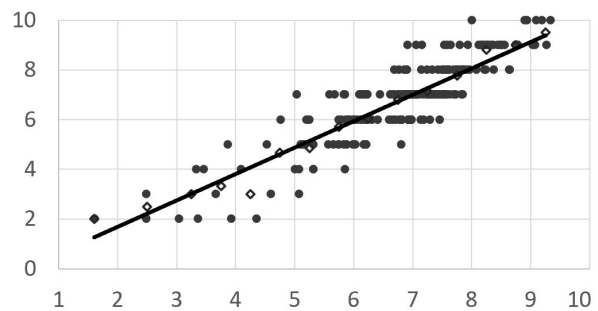
На рис. 2 (*внизу*) видно, что спад условной энтропии приходится на цепочки длиной от 8 символов.

График условной энтропии для 32 нейронов с длительностью записи, превышающей 3000 спайков, показан на рис. 3. Два нейрона выделяются, остальные дают сходную динамику, с минимумом в диапазоне 8–10 символов.

Для характеристики кривой спада условной энтропии при росте длины цепочки возьмем позицию экстремума спада этой величины как позицию минимума при вычитании последовательных значений условной энтропии (рис. 2, *внизу*; рис. 3, *внизу*). Зависимость этой позиции экстремума от количества спайков в записи показана на рис. 4 и 5. Для коротких записей эта величина заметно варьируется для разных нейронов, но при длинах записи более 3000 спайков она оказывается в интервале 8–10 символов. Это может означать, что при более длинных записях нейроны могут меньше различаться между собой по условной энтропии символической динамики. Также это может означать, что при короткой длине записи метод расчета условной энтропии не дает достоверных результатов, поскольку значение экстремума сильно зависит от количества спайков в записи.



**Рис. 4.** Позиция экстремума спада условной энтропии (по вертикали) в зависимости от длительности записи нейронов (по горизонтали). Одна точка – один нейрон, всего 210 нейронов. Для нейронов, имеющих в записи более 3000 межспайковых интервалов, позиция экстремума оказывается в интервале 8–10 символов



**Рис. 5.** Позиция экстремума спада условной энтропии (по вертикали) в зависимости от логарифма длительности записи 210 нейронов (по горизонтали). 3000 межспайковых интервалов соответствует делению 8 по горизонтали. Видна сильная корреляция позиции экстремума (по вертикали) и логарифма длины записи (по горизонтали). Не закрашенными точками показаны средние значения, по ним построена линейной аппроксимацией линия тренда

### Выводы

При использовании оценки условной энтропии символической динамики нейронной активно-

сти необходимо учитывать длину записи (число спайков), поскольку обнаружена сильная прямая корреляция между точкой экстремума условной энтропии и числом спайков в записи. Можно сравнивать по методу условной энтропии символической динамики только нейроны, имеющие примерно сходное количество спайков в записи. При сравнении нейронов, имеющих существенно отличающиеся количества спайков в записях, возможна их классификация как дающих значение точки экстремума выше или ниже линии тренда с использованием соответствующего статистического критерия.

Работа выполнена по государственному заданию ФАНО № 0138-2021-0002.

### **Литература**

1. *Загускин С.Л.* Ритмы клетки и здоровье человека. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2010. 296 с.
2. *Гуров Ю.В.* Разработка методов символической динамики для системного анализа кардиологических процессов: автореф. дис. ... к.т.н. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2012. 20 с.
3. *Гуров Ю.В.* Символическая динамика в приложении к исследованию ритма сердца // Известия вузов: Прикладная нелинейная динамика. 2010. № 4. С. 54–67.
4. *Крылов А.К. и др.* Объективация системных показателей состояния организма: от физиологического процесса к последовательности символов // Пятая международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов. В 2 т. Калининград, 2012. Т. 2. С. 477–478.
5. *Крылов А.К.* Метод символической динамики для анализа нейронной активности // Труды XVI Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2014». В 3-х частях. Ч. 2. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. С. 166–174.

# Порождение конфликтности мнений в социуме алгоритмами социальных сетей интернета

А.К. Крылов

Институт психологии РАН, г. Москва

## Введение

На формирование мнений людей оказывает давление социальная сеть интернета – в ней человеку предлагается определенная информация специфической направленности. Содержание информации, получаемой из социальных сетей интернета, зависит не только от выбора человеком постов для прочтения и видео для просмотра, но также от предлагаемых социальной сетью. «Алгоритм ранжирования» постов и видео определяет, какая информация будет предложена пользователю. Постановка «лайка» пользователем приводит к тому, что ему далее с большей вероятностью предлагается информация от того же автора и источника, которые были положительно оценены теми людьми, которые тоже поставили «лайк» на эту, – происходит канализация подачи информации и вписывание человека в определенную аудиторию социальной сетью. Это означает, что человек, положительно оценивший некоторую информацию, с большей вероятностью будет получать информацию с аналогичным содержанием и не будет получать противоположную информацию по этой теме. Такой алгоритм работы соцсети может способствовать усугублению мнения человека, снижая шансы на изменение мнения. Для проверки этой гипотезы нами проведено модельное исследование.

Рассмотрим некоторую тему, в которой каждый человек может придерживаться некоторой позиции между «да/за» и «нет/против». В известной модели Дюркгейма [1] предполагается, что человек усиливает свои социально-информационные связи с теми, кто близок к его позиции (стратегия 1). Это кажется правдоподобным, однако в этой модели учитывается только абсолютная разность между позициями, поэтому, имея, например, позицию «скорее за, чем против», человек укрепит связь с тем, кто имеет позицию «скорее против, чем за», и ослабит связь с тем, кто имеет позицию «точно за». Можно предположить и другую стратегию, в которой человек склонен выбирать тех, кто усиливает его текущее мнение (стратегия 2) [2].

В настоящей работе рассмотрим социум, в котором есть люди, использующие обе стратегии, и изучим, как влияет рост количества людей, пользующихся стратегией 2, на динамику мнений в контексте возможного конфликта мнений. Существенную роль в этом может играть «алгоритм ранжирования» постов и видео социальной сетью.

## Методика

Используем модель формирования мнений на основе связей в соцсети, аналогичную модели Дюркгейма [1]:

$$\Delta Opi_n = a * \left( \frac{\sum_{k=1}^N W_{n,k} * Opi_k}{\sum_{k=1, k \neq n}^N W_{n,k}} - Opi_n \right). \quad (1)$$

Здесь  $Opi_n$  – мнение человека  $n$  по данной теме (вещественное число от 0 – «нет/против», до 1 – «да/за»). Формула означает, что мнение человека постепенно приближается к мнению тех, с кем он связан в соцсети, и скорость изменения мнения определяется параметром  $a$  ( $a = 0,1$ ). Рассматривался социум из 100 человек ( $N = 100$ ). Информационные связи  $W_{nk}$  с другими членами или каналами социальной сети определяют, чью информацию человек получает.

В модели Дюркгейма предполагается, что человек усиливает связи с теми, кто транслирует информацию, близкую к его мнению, независимо от того, в какую сторону отклоняется их позиция от его позиции (стратегия 1):

$$\Delta W_{n,k} = w * (e^{-|Opi_n - Opi_k|/0.1} - W_{n,k}). \quad (2)$$

В такой модели значима абсолютная близость мнений – например, кто «немного за» ( $Opi_n = 0,6$ ) больше усилит связь с тем, кто «немного против» ( $Opi_k = 0,4$ ; разница 0,2), чем с тем, кто четко «за» ( $Opi_k = 1$ ; разница 0,4), что представляется неправдоподобным, поскольку предполагает, что человек легко меняет свои взгляды.

В настоящей работе также изучалась иная стратегия формирования мнения [2] (стратегия 2): имея определенную интенцию «за» ( $Opi_n > 0,5$ ) или «против» ( $Opi_n < 0,5$ ), человек предпочитает ставить «лайки» на информацию, усиливающую его позицию ( $Opi_k > Opi_n$  или  $Opi_k < Opi_n$  соответственно), и ослаблять связь с теми, кто не усиливает его мнение ( $Opi_k < Opi_n$  или  $Opi_k > Opi_n$  соответственно):

$$\Delta W_{n,k} = w * (1 - W_{n,k}), \quad (3)$$

$$\Delta W_{n,k} = w * (0 - W_{n,k}). \quad (4)$$

Предположим, что социум состоит из некоторого процента  $N2$  людей, придерживающихся этой стратегии 2. При  $N2 = 0\%$  получаем модель Дюркгейма.

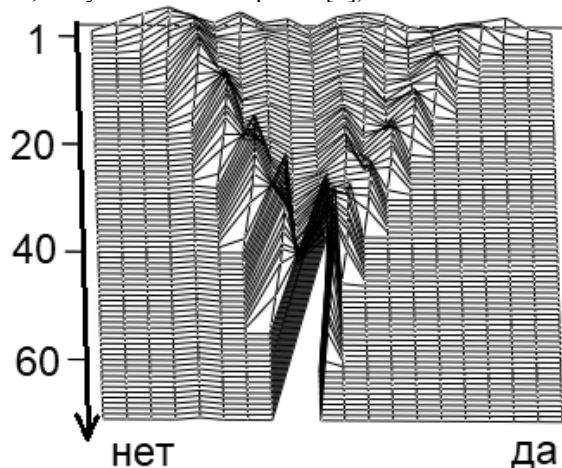
Начальное распределение мнений – случайное (рис. 1 и 2, сверху, ордината = 1). Расчет модели проводился усреднением по 50 итерациям, в каждой по 100 итераций обмена мнениями и изменения связей.

Далее представлены результаты для  $w = 0,5$ . В этом случае скорость изменения связей лишь в 5 раз выше, чем скорость изменения мнения ( $a = 0,1$ ). Это представляется довольно «мягким» вариантом, поскольку скорость изменения связей

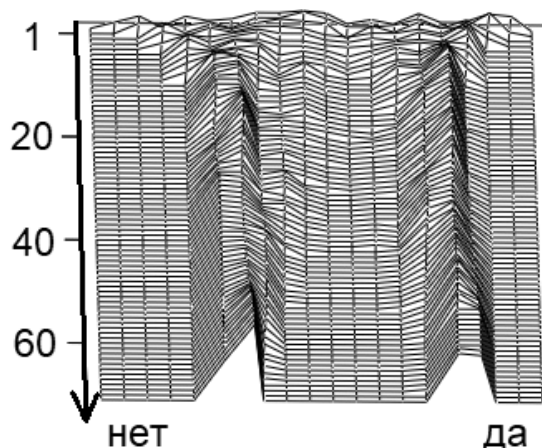
в социальной сети очень большая – достаточно посмотреть одно видео или поставить «лайк», и алгоритм ранжирования сам вписывает человека в определенную аудиторию, независимо от того, успел ли человек изменить свою позицию.

### Результаты

Если в социуме все используют только стратегию 1 ( $N2 = 0\%$ , эквивалентно модели Дюркгейма), то для любых значений  $a$  и  $w$  социум усредняет свои стартовые расхождения во мнениях, приходя к единому среднему консенсусу – пример динамики мнений представлен на рис. 1 (результат, полученный нами ранее [2]).



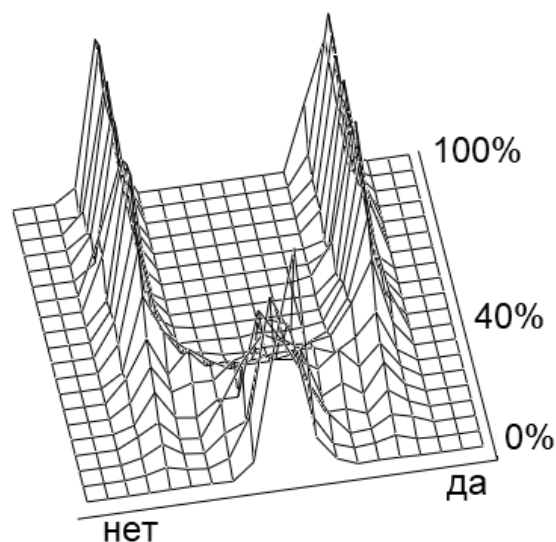
**Рис. 1.** Пример динамики мнений в модели при  $N2 = 0\%$  (эквивалентно модели Дюркгейма). По горизонтали – позиция, измеряемая от 0 – четкое «нет», до 1 – четкое «да». Высота столбцов отражает количество человек, придерживающихся данного мнения. Вертикальная ось – итерации. Вначале мнения равномерно распределены (вверху). Постепенно весь социум сходится к некоему среднему мнению (внизу) между «да» и «нет», к единой позиции



**Рис. 2.** Динамика мнений в модели при  $N2 = 40\%$ . Обозначения те же. Вначале мнения равномерно распределены (вверху). Постепенно весь социум разделяется на две группы – одни склонны быть «за», другие «против»

В случае, если в социуме 40% людей используют стратегию 2 ( $N2 = 40\%$ ) и только 60% – стратегию 1, результаты получаются иные: социум разбивается на две группы людей, склонных к

противоположным взглядам (пример динамики показан на рис. 2).



**Рис. 3.** Статистика результатов для разной величины  $N2$  (вертикальная ось). По горизонтали – позиция, измеряемая от 0 – четкое «нет», до 1 – четкое «да». Высота столбцов отражает количество человек, придерживающихся данного мнения после 100 итераций обмена мнениями. Видно, что с увеличением доли людей, использующих стратегию 2, от 0% до 35% социум перестает иметь консенсус, а при значениях от 40% и более – социум разбивается на две четкие группы, имеющие разные взгляды

Результаты для разных значений  $N2$  показаны на рис. 3. При низких значениях  $N2$  (от 0% до 10%) социум имеет консенсус, далее, с ростом  $N2$  до 35%, консенсус распадается и социум имеет широкое разнообразие взглядов, а при дальнейшем увеличении  $N2$  от 40% и более – социум разбивается на две четкие группы, имеющие разные позиции, что может способствовать созданию конфликта мнений в социуме.

### Выводы

Влияние современных алгоритмов социальной сети на получение информации пользователями может приводить к разбиению социума на два лагеря и способствовать созданию социального конфликта мнений. Такой конфликт возникает, если в социуме большой процент людей, склонных положительно оценивать информацию, соответствующую их взглядам.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-29-22045).

### Литература

1. Mas M., Flache A., Helbing D. Individualization as Driving Force of Clustering Phenomena in Humans // PLoS Comput. Biol. 2010. V. 6(10). Art. e1000959.
2. Крылов А.К. Усиление конфликтности мнений в социуме социальными сетями интернета: модельное исследование // Сборник трудов 1-го национального конгресса по когнитивной науке. 2020. [в печати].

# Идентификация функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий

О.А. Кузенков

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
email: kuzenkov\_o@mail.ru

В настоящее время технологии нейронных сетей широко используются в биологических исследованиях [1–4]. В работах [5–8] было показано, что их можно успешно применять для реконструкции функции биологической приспособленности – фитнеса. Современные подходы к эволюционному моделированию чаще всего опираются на максимизацию определенного критерия [9, 10], отражающего конкурентные преимущества наследственных элементов в биологическом сообществе [11–13]. Соответствующий критерий называется функцией приспособленности (фитнеса) [14, 15]. В [16] фитнес был определен для уравнения динамики мер с наследованием как среднее временное значение удельной скорости воспроизводства. Такой подход позже был развит в работах [17–20]. На основе этих исследований был предложен численный метод восстановления фитнес-функции по наблюдаемой динамике конечного подмножества конкурирующих элементов [5–8, 21]. Задача была решена при существенном предположении о том, что эволюционный фитнес не зависит ни от начального состояния популяции, ни от множества конкурирующих элементов. Однако в общем случае функция приспособленности может зависеть как от того, так и от другого [22]. Например, возможна ситуация, когда в одной и той же паре наследственных элементов первый элемент может быть как лучше, так и хуже второго в зависимости от того, в каком множестве конкурирующих элементов они сосуществуют [23].

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы продемонстрировать, как технологии машинного обучения могут быть использованы для построения функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих наследственных элементов. Разработанная методика применяется для поиска эволюционно устойчивых стратегий суточных вертикальных миграций (СВМ) зоопланктона.

Феномен суточных вертикальных миграций (СВМ) водных организмов был открыт двести лет назад [14]. Этот феномен считается наиболее значимым синхронным движением биомассы на Земле [24] и потенциально может влиять на климат в планетарном масштабе [25]. Выявление причин и механизмов СВМ зоопланктона является важной проблемой в современной экологии [26].

В настоящей работе закономерности СВМ зоопланктона исследованы в рамках обобщенной модели Вольтерра «хищник – жертва» с несколькими видами жертв [27, 28]. В качестве жертв рассматривается множество различных видов зоопланктона, которые отличаются друг от друга наследственными стратегиями вертикальных мигра-

ций  $v_i$ ;  $Q$  – соответствующее множество различных наследственных стратегий. Каждая стратегия  $v_i$  определяет периодическое изменение вертикальной координаты  $x$  положения зоопланктона в течение суток, то есть функцию  $x(\tau)$ ;  $0 < \tau < 1$ ,  $x(0) = x(1)$ . Пусть  $\rho(v_i, t)$  – численность субпопуляции зоопланктона, реализующего стратегию  $v_i$ ,  $F(t)$  – численность популяции хищника (планктоноядной рыбы). Уравнения модели имеют вид

$$\rho'_t(v_i, t) = r(v_i)\rho(v_i, t) - c(v_i)\rho(v_i, t)F(t) - \rho(v_i, t) \sum_{v_j \in Q} \rho(v_j, t);$$

$$F'_t(t) = F(t) \sum_{v_j \in Q} c(v_j)\rho(v_j, t) - F(t).$$

Стратегия  $v_i$  будет лучше (или приспособленнее), чем  $v_j$ , если

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(v_j, t) / \rho(v_i, t) = 0.$$

Функция фитнеса выражается формулой

$$J(v_i, Q) = r(v_i) - \langle F(Q) \rangle c(v_i).$$

Здесь  $\langle F(Q) \rangle$  – предел переменной  $F(t)$  при  $t \rightarrow \infty$ ;  $\langle F(Q) \rangle$  определяется выживающим видом жертвы, который в свою очередь определяется множеством  $Q$  конкурирующих стратегий.

Эмпирические данные свидетельствуют о том, что СВМ зоопланктона определяются следующими факторами окружающей среды: распределением пищи (фитопланктона)  $E(x)$  по глубине  $x$ , плотностью распределения хищников  $S_x(x)$ , распределением неблагоприятных факторов обитания (температуры и сероводорода)  $G(x)$ , а также суточной активностью хищника  $S_t(\tau)$  [14–25]. Соответственно, следующие четыре макропараметра оказывают наибольшее влияние на выживание субпопуляции зоопланктона [29, 30]:

$$M_1(v_i) = \int_0^1 E(x(\tau)) d\tau, \quad M_2(v_i) = - \int_0^1 S_t(\tau) S_x(x(\tau)) d\tau,$$

$$M_3(v_i) = - \int_0^1 (x'(\tau))^2 d\tau, \quad M_4(v_i) = - \int_0^1 G(x(\tau)) d\tau.$$

Приведенные выше параметры имеют следующий биологический смысл:  $M_1$  – количество потребляемой пищи (фитопланктона) в сутки;  $M_2$  – суточная смертность от хищничества;  $M_3$  – метаболические затраты на осуществление вертикальных миграций (мы предполагаем, что они пропорциональны кинетической энергии движения);  $M_4$  – дополнительная суточная смертность зоопланктона из-за входа в приповерхностные или глубинные воды, которые характеризуются неблагоприятными температурными и сероводородными условиями.

Будем использовать простейшие линейные аппроксимации коэффициентов  $c$  и  $r$ :

$$r(v_i) = \lambda_1 M_1 + \lambda_3 M_3 + \lambda_4 M_4, \quad c(v_i) = -\gamma M_2,$$

где весовые коэффициенты  $\lambda_k$  и  $\gamma$  отражают влияние каждого ключевого фактора и не зависят от стратегии  $v_i$ .

В этом случае функция приспособленности имеет вид

$$J(v_i, Q) = \lambda_1 M_1 + \lambda_3 M_3 + \lambda_4 M_4 + \langle F(Q) \rangle \gamma M_2$$

или, если ввести обозначение  $\lambda_2 = \langle F(Q) \rangle \gamma$ , вид линейной свертки вектора ключевых параметров  $M = (M_1, \dots, M_4)$ :

$$J(M, Q) = \sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k.$$

Пусть имеются долгосрочные данные о поведении экосистемы «рыба – зоопланктон» для некоторого известного конечного множества наследственных стратегий  $Q_0 = \{v_1, \dots, v_m\}$ , то есть данные о динамике численностей  $\rho(v_1, t), \dots, \rho(v_m, t)$  и  $F(t)$ . Тогда можно найти значения ключевых параметров  $M(v_i)$  для всех стратегий. Далее, по этим данным можно оценить пределы отношений  $\rho(v_j, t)/\rho(v_i, t)$  для всех пар  $(v_i, v_j)$  и упорядочить стратегии в соответствии с их конкурентными преимуществами в рамках данного множества  $Q_0$ . В случае, когда  $v_i$  лучше, чем  $v_j$ , должно выполняться неравенство  $J(M(v_i), Q_0) > J(M(v_j), Q_0)$ , соответственно коэффициенты  $\lambda_k$  должны удовлетворять неравенству

$$\sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k(v_i) > \sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k(v_j).$$

Теперь можно оценить коэффициенты функции приспособленности, решая полученную систему линейных неравенств относительно коэффициентов  $\lambda$  по всем парам стратегий. После этого, зная предельное значение численности хищника, можно восстановить коэффициент  $\gamma$  по коэффициенту  $\lambda_2$ .

Здесь мы используем новый подход к нахождению коэффициентов фитнеса с помощью современных методов распознавания образов [5–8]. Поставим в соответствие паре  $(v_i, v_j)$  точку  $(M(v_i) - M(v_j))$  и паре  $(v_j, v_i)$  – точку  $(M(v_j) - M(v_i))$  в четырехмерном пространстве параметров. Тогда гиперплоскость

$$\sum_{k=1}^4 \lambda_k M_k = 0$$

должна отделять эти точки друг от друга. Рассмотрим всевозможные пары стратегий из множества  $Q_0$ , получаем два множества точек в четырехмерном пространстве, которые должны лежать по разные стороны от указанной гиперплоскости. Таким образом, задача определения коэффициентов  $\lambda_k$  функции приспособленности сводится к нахождению компонента нормали гиперплоскости, разделяющей два множества точек в четырехмерном пространстве. Это типичная задача распознавания образов, или задача бинарной классификации, которая может быть решена на основе построения обучающейся нейронной сети [31–33].

Решение задачи идентификации функции приспособленности для СВМ зоопланктона было проведено на основе эмпирических данных, собранных в северо-восточной части Черного моря летом 2011 г. [29]. Применялись простейшие линейные и квадратичные аппроксимации функций внешних факторов  $E$ ,  $S_x$  и  $G$ :  $E = \sigma_1(x + D)$ ,  $S_x = \sigma_2(x + D)$ ,  $-D < x < 0$ ;  $G = (x + D_0)^2$ , а также аппроксимация функции  $S_T$  в виде синусоидальной зависимости:  $S_T = \cos(2\pi\tau) + 1$ ,  $0 < \tau < 1$ . Здесь  $D$  и  $D_0$  – некоторые характерные глубины,  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  – константы. Из эмпирических данных были найдены значения соответствующих констант:  $D = 140$  м,  $D_0 = 80$  м,  $\sigma_1 = 0,367$ ,  $\sigma_2 = 0,833$ .

Для решения задачи идентификации фитнеса была построена однослойная нейронная сеть. При создании и работе с сетью использовалось следующее программное обеспечение: библиотека машинного обучения Scikit-learn для Python; библиотека Pandas (для обработки и анализа данных) и библиотека Numpy (для работы с большими многомерными массивами).

Обучающая выборка содержала 202 различные стратегии. Рассматриваемая выборка была разделена на обучающую часть (70 %) и часть, используемую для тестирования (30 %), с помощью модуля `train_test` из библиотеки `sklearn.model.selection`. Для оценки эффективности обучения использовался модуль `Logloss`, который показывает хороший результат (`logloss = 0,01701`). Также использовался другой способ проверки эффективности обучения – на основе перекрестной оценки функции из библиотеки `sklearn.model`. В этом случае успешность обнаружения объекта составляла 99,89 %.

Обученная нейронная сеть для указанной выше параметризации дает следующие значения коэффициентов функции фитнеса:  $\lambda_1 = 3$ ,  $\gamma = 0,0017$ ,  $\lambda_3 = 2,5e - 0,5$ ,  $\lambda_4 = 0,01$ .

Для валидации созданного программного обеспечения использовалось компьютерное моделирование популяционной динамики на основе уравнений модели.

При этом фиксировались значения коэффициентов  $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4, \gamma$ , генерировался набор стратегий  $v_1, \dots, v_m$ , в котором каждая стратегия  $v_i$  аппроксимировалась суммой первых членов разложения Фурье:  $x(\tau) = A_i + B_i \cos 2\pi\tau$ . Затем рассчитывались соответствующие значения ключевых параметров и решалась система дифференциальных уравнений модели. На основе расчетных данных было осуществлено упорядочение стратегий по их селективным способностям. С помощью нейронной сети были получены коэффициенты фитнеса. С учетом рассчитанной динамики величины  $F$  было восстановлено значение  $\gamma$ . В результате исходные фиксированные и восстановленные значения были очень близки. Косинус угла между векторами, образованными этими коэффициентами, составляет 0,999998, что означает, что угол между векторами практически равен нулю. Это свидетельствует об эффективности разработанной методики идентификации функции фитнеса с помощью нейронной сети.

Обратим внимание, что хотя задача идентификации фитнеса решалась для фиксированного множества  $Q_0$  (обучающей выборки), полученные коэффициенты  $\lambda_1, \gamma, \lambda_3, \lambda_4$  не зависят от этого множества. Их значения не изменятся при переходе к любому другому интересующему нас множеству стратегий  $Q$ .

Покажем, как на основе полученной информации об идентифицированных коэффициентах можно предсказать лучшую стратегию  $v_0$  для любого множества  $Q$  конкурирующих стратегий.

Рассмотрим ситуацию, когда выживает только одна стратегия  $v_0 \in Q$  (с соответствующими коэффициентами  $c(v_0), r(v_0)$ ). Находя координаты единственного устойчивого состояния равновесия модели, получаем выражение для предельного значения количества хищника:

$$\langle F(Q) \rangle = r(v_0) c(v_0) - 1/c^2(v_0).$$

Стратегия  $v_0$  будет лучшей в  $Q$  относительно любой другой стратегии  $w \in Q$  с соответствующими коэффициентами  $c(w), r(w)$ , если выполняется неравенство  $J(w, Q) < J(v_0, Q)$ , то есть

$$r(w) - \langle F(Q) \rangle c(w) < r(v_0) - \langle F(Q) \rangle c(v_0),$$

или

$$r(w) - c(w) \left( r(v_0) c(v_0) - \frac{1}{c^2(v_0)} \right) < \\ < r(v_0) - c(v_0) \left( r(v_0) c(v_0) - \frac{1}{c^2(v_0)} \right) \equiv \frac{1}{c(v_0)}.$$

Иными словами, для наилучшей стратегии  $v_0$  будет справедливо соотношение

$$\min_{w \in Q} \left[ \frac{1}{c(v_0)} - r(w) + c(w) \left( r(v_0) c(v_0) - \frac{1}{c^2(v_0)} \right) \right] = 0.$$

Если стратегия  $v$  не является наилучшей для множества  $Q$ , то найдется хотя бы одна стратегия  $w$  из  $Q$ , для которой выполнится неравенство

$$r(w) - c(w) \left( r(v) c(v) - \frac{1}{c^2(v)} \right) > \frac{1}{c(v)},$$

то есть

$$\min_{w \in Q} \left[ \frac{1}{c(v)} - r(w) + c(w) \left( r(v) c(v) - \frac{1}{c^2(v)} \right) \right] < 0.$$

Следовательно, чтобы найти лучшую стратегию  $v_0$  в  $Q$ , нужно максимизировать выражение

$$J_0(v) = \min_{w \in Q} \left[ \frac{1}{c(v)} - r(w) + c(w) \left( r(v) c(v) - \frac{1}{c^2(v)} \right) \right]$$

по всем стратегиям  $v$  в множестве  $Q$ . Это выражение можно рассматривать как обобщенный фитнес для множества  $Q$ . Учитывая линейную зависимость коэффициентов  $c$  и  $r$  от ключевых параметров, можно выразить обобщенный фитнес через них:

$$J_0(v) = \min_{w \in Q} \left( \frac{M_2(w) - M_2(v)}{\gamma M_2^2(v)} + \right. \\ \left. + (\lambda_1 M_1(v) + \lambda_3 M_3(v) + \lambda_4 M_4(v)) (\gamma^2 M_2(v) M_2(w) - 1) \right).$$

Очевидно, что обобщенный фитнес будет меняться при изменении множества  $Q$ , но значения коэффициентов, фигурирующих в его выражении,

меняться не будут. Для нахождения эволюционно устойчивой стратегии, соответствующей выбранному множеству конкурирующих стратегий, нужно решить оптимизационную максиминную задачу. Эта задача решается с помощью численных методов оптимизации [23].

Решение такой оптимизационной задачи с идентифицированными перед этим значениями коэффициентов позволяет достаточно точно смоделировать реальное поведение кладоцера *Pseudocalanus elongatus* в северо-восточной части акватории Черного моря.

Результаты проведенного исследования внедрены в учебный процесс в виде проектных заданий в рамках дисциплины «Математическое моделирование процессов отбора» для бакалавров направления «Прикладная математика и информатика» Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского [34].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 14.Y26.31.0022).

## Литература

1. *Abiodun O.I. et al.* State-of-the-art in artificial neural network applications: A survey // *Heliyon*. 2018. V. 4 (11).
2. *Kuzenkov O., Morozov A., Kuzenkova G.* Recognition of patterns of optimal diel vertical migration of zooplankton using neural networks // *Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks*. Budapest, 2019.
3. *Kuzenkov O.* Information technologies of evolutionarily stable behavior recognition // *Commun. Comput. Inf. Sci.* 2020. V. 1201. P. 250–257.
4. *Ayraud M.M. et al.* Transcriptional programs define intratumoral heterogeneity of ewing sarcoma at single-cell resolution // *Cell Rep.* 2020. V. 30 (6). P. 1767–1779.
5. *Kuzenkov O., Kuzenkova G.* Identification of the fitness function using neural networks // *Procedia Comput. Sci.* 2020. V. 169. P. 692–697.
6. *Kuzenkov O., Morozov A., Kuzenkova G.* Machine learning evaluating evolutionary fitness in complex biological systems // *Proceedings of the 2020 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Glasgow, 2020. Piscataway : IEEE, 2020.
7. *Кузенков О.А., Кузенкова Г.В.* Идентификация функции приспособленности с использованием нейронных сетей // *Труды VI Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях»*. Н. Новгород, 2019. С. 103–106.
8. *Kuzenkov O., Morozov A., Kuzenkova G.* Exploring evolutionary fitness in biological systems using machine learning methods // *Entropy*. 2021. V. 23 (1). P. 35.
9. *Demidova A., Druzhinina O., Jaćimović M., Mijajlovic N., Masina O.* Problems of synthesis, analysis and optimization of parameters for multidimensional mathematical models of interconnected populations dynamics // *Commun. Comput. Inf. Sci.* 2020. V. 1145. P. 56–71.
10. *Demidova A.V., Druzhinina O.V., Masina O.N., Petrov A.A.* Computer research of the controlled models with migration flows // *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. P. 117–129.
11. *Gyllenberg M., Metz J.H., Service R.* When do optimisation arguments make evolutionary sense? // *The Mathematics of Darwin's Legacy*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011.

12. Петров А.А., Дружинина О.В., Масина О.Н., Щербаков А.В. Задача поиска оптимальных траекторий для управляемой популяционной модели, учитывающей конкуренцию и миграцию // Ученые записки УлГУ. Сер.: Математика и инф. технологии. 2020. № 2. С. 41–54.
13. Dissanayake C., Juan L., Long K.R., Peace A., Rana M.M. Genotypic selection in spatially heterogeneous producer-grazer systems subject to stoichiometric constraints // Bulletin of Mathematical Biology. 2019. V. 81, № 11. P. 4726–4742.
14. Clark C.W., Mangel M. Dynamic State Variable Models in Ecology: Methods and Applications, Oxford Series in Ecology and Evolution. Oxford: Oxford University Press, 2000.
15. Fiksen O., Giske J. Vertical distribution and population dynamics of copepods by dynamic optimization // ICES J. Mar. Sci. 1995. V. 52. P. 483–503.
16. Горбань А.Н. Обход равновесия. М.: Наука, 1984.
17. Кузенков О.А. Исследование динамической системы вероятностных мер Радона // Дифференциальные уравнения. 1995. Т. 31, № 4.
18. Kuzenkov O., Ryabova E. Variational Principle for Self-replicating Systems // Math. Model. Nat. Phenom. 2015. V. 10, № 2. P. 115–128.
19. Kuzenkov O.A., Novozhenin A.V. Optimal control of measure dynamic // Comm. Nonlinear. Sci. Numer. Simulat. 2015. V. 21 (13). P. 159–171.
20. Kuzenkov O., Morozov A. Towards the Construction of a Mathematically Rigorous Framework for the Modelling of Evolutionary Fitness // Bull. Math. Biol. 2019. V. 81(11). P. 4675–4700.
21. Kuzenkov O.A., Ryabova E.A. Limit possibilities of solution a hereditary control system // Differential Equations. 2015. V. 51, № 4. P. 523–532.
22. Kuzenkov O.A. The investigation of the population dynamics control problem based on the generalized Kolmogorov model // J. Computer and Systems Sciences International. 2009. V. 48, № 5. P. 839–846.
23. Sandhu S., Morozov A., Kuzenkov O. Revealing Evolutionarily Optimal Strategies in Self-Reproducing Systems via a New Computational Approach // Bull. Math. Biol. 2019. V. 81 (11). P. 4701–4725.
24. Kaiser M.J. et al. Marine Ecology: Processes, Symptoms and Impacts. Oxford: Oxford University Press, 2005. P. 557.
25. Archibald K.M., Siegel D.A., Doney S.C. Modeling the impact of zooplankton diel vertical migration on the carbon export flux of the biological pump // Global Biogeochem. Cycles. 2019. V. 33. P. 181–199.
26. Kelly T.B. et al. The importance of mesozooplankton diel vertical migration for sustaining a mesopelagic food web // Frontiers in Marine Science. 2019. V. 6. P. 508.
27. Kuzenkov O.A. An optimal control for a Volterra distributed system // Automation and Remote Control. 2006. V. 67, № 7. P. 1028–1038.
28. Kuzenkov O.A., Kuzenkova G.V. Optimal control of self-reproduction systems // J. Computer and Systems Sciences International. 2012. V. 51, № 4. P. 500–511.
29. Morozov A., Kuzenkov O., Arashkevich E. Modeling optimal behavioral strategies in structured populations using a novel theoretical framework // Sci. Rep. 2019. V. 9.
30. Morozov A., Kuzenkov O. Towards Developing a General Framework for Modelling Vertical Migration in Zooplankton // J. Theor. Biol. 2016. V. 405. P. 17–28.
31. Трокоз Д.А. Алгоритм машинного обучения широких нейронных сетей с использованием алгебры гиперразмерных двоичных векторов и генетических алгоритмов // Южно-Сибирский научный вестник. 2020. № 6 (34). С. 148–154.
32. Басалин П.Д., Кумагина Е.А., Неймарк Е.А., Тимофеев А.Е., Фомина И.А., Чернышова Н.Н. Реализация гибридной интеллектуальной обучающей среды производственного типа // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14, № 1. С. 256–267.
33. Басалин П.Д., Тимофеев А.Е. Оболочка гибридной интеллектуальной обучающей среды производственного типа // Образовательные технологии и общество. 2018. Т. 21, № 1. С. 396–405.
34. Кузенков О.А., Кузенкова Г.В., Киселева Т.П. Компьютерная поддержка учебно-исследовательских проектов в области математического моделирования процессов отбора // Образовательные технологии и общество. 2019. Т. 22, № 1. С. 152–163.
35. Кузенков О.А., Кузенкова Г.В., Киселева Т.П. Использование электронных средств обучения при модернизации курса «Математическое моделирование процессов отбора» // Образовательные технологии и общество. 2018. Т. 21, № 1. С. 435–448.



## К вопросу о механизме шизофрении

А.А. Кузнецов

email: alex\_kuzn@rambler.ru; don.kuznaa@yandex.ru

В условиях меняющегося климата нас уже не удивляют яблони, цветущие не весной, а при резком потеплении воздуха. Но можно увидеть за этим явлением фундаментальный принцип управления, когда любая система управляется **внешним** воздействием. Любой внешний сигнал (звук, свет, температура и проч.) есть управляющее воздействие на организм. Мозг в целом, как блок управления организмом, лишь подстраивает организм под изменения среды.

Вместе с тем роль ежесекундных изменений внешней обстановки (а любое изменение ее и есть сигнал!) не очевидна в психической деятельности. Взаимосвязь разумной (адаптированной) и неразумной (неадаптированной) деятельности человека и внешних сигналов скрыта от поверхностного взгляда потому, что низовая обработка сенсорных сигналов осуществляется на «досознательном» уровне, и лишь результат «вычислений» попадает в сознание.

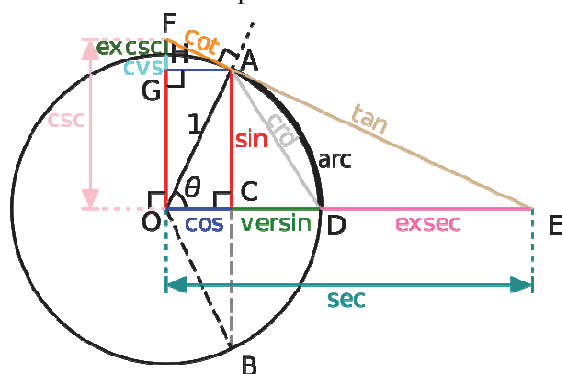
Роль сенсорных сигналов в мышлении человека предельно ясна лишь в особых, искусственно созданных условиях, а также в экспериментах, включая восприятие иллюзий. Кино, телевидение, стереозвук – суть устройства, создающие иллюзии. Включение звука с большей амплитудой сигнала непроизвольно переключит внимание слушателя на этот источник. Временная задержка между двумя звуковыми сигналами управляет кажущимся перемещением источника звука. Фильтрация сигналов затрудняет распознавание фотографии или же улучшает его, повысив качество изображения. Эпилептиформная активность мозга вызывается ритмами внешних световых или электрических сигналов. Следовательно, меняя основные параметры сигналов (амплитуду, частоту и фазу), можно управлять состоянием мозга. Эти примеры не умаляют значения реакции самого организма в случае любой патологии, и психической в частности, но лишь подчеркивают изначальную роль изменений внешней среды.

Без внимания психиатров, как не связанные с психической патологией, остаются известные с 18 века (Ш. Бонне) зрительные галлюцинации у больных с катарактой. Галлюцинации считаются «восприятием без объекта», в отличие от иллюзий, где наличие физических сигналов среды установлено однозначно. Описывая галлюцинаторный зрительный образ, например, как белый платок, летающий в воздухе, исходят из того, что такого предмета в реальности нет. Но есть универсальный носитель любой зрительной информации – световые волны. И есть неисправная часть системы зрения (хрусталик). Это, по факту – модель, объясняющая природу любых галлюцинаций. Свет как несущие частоты, изменения которых дают информацию о внешней среде, проходя че-

рез пораженные части глаз, меняет распределение частот, которое распознается, интерпретируется мозгом как несуществующий образ. Термин «галлюцинации» – исторический анахронизм. Разумно использовать для подобных явлений термин «иллюзии».

Известен феномен, характерный для восприятия больных параноидной шизофренией, когда речь диктора из телевизора воспринимается не как адресованная неопределенному кругу лиц, зрителям вообще, а как обращенная непосредственно к больному, к нему лично. Эти ощущения возможны только в одном случае. Когда внимание больного фокусируется не на плоскости экрана как неосознаваемой границе источника звука и изображения, а выносится существенно дальше, «за плоскость экрана», в некое пространство «зазеркалья». В этом случае исчезает постоянно присутствующее, но неосознаваемое зрителем (если на нем не заострить внимание специально), пространство между зрителем и телевизором. Подобные умозрительные модели обоснованы, если учесть, что взгляд больного шизофренией расфокусирован, направлен не на собеседника, а как бы сквозь него.

Для иллюстрации взаимоотношений между неким условным зрительным сигналом и мозгом воспользуемся единичной окружностью с центром в начале координат. Представим, что наблюдатель в начале координат видит на некотором расстоянии от себя вертикальный зрительный объект. Пожертвуем взаимным соответствием размеров наблюдателя и объекта в целях наглядности, для чего точка А будет располагаться на окружности значительно выше по оси ординат, нежели это могло иметь место в реальности.



Источник: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/9d/Circle-trig6.svg/1920px-Circle-trig6.svg.png>

В потенциально враждебном окружении для выживания организма особое значение имеют три параметра этого изображения – **синус** и **косинус** как геометрический размер видимого предмета и расстояние до предмета (для единичной окружности), а также **их отношение**.

Наблюдатель и видимый объект во внешней обстановке, где агрессия естественна как воздух, могут перемещаться. Чтобы выжить, любое существо должно постоянно оценивать скорость (тенденции) изменения расположения объекта по отношению к организму, которая характеризуется производной (в физическом смысле). Геометрический же смысл производной заключается в том, что численно производная функции в данной точке равна тангенсу угла, образованного касательной, проведенной через эту точку к данной кривой, и положительным направлением оси ОЕ.

Роль нахождения производных, иными словами дифференцирования, и противоположного действия – интегрирования (нахождения первообразной) – в мыслительной деятельности не понятна. Общая психология вплотную подошла к этому, но прямых, непосредственных выводов не сделала [1]. Дифференцирование как различение и последующее интегрирование как объединение лежат в основе мышления, независимо от вида его, математические ли это вычисления, музыкальные ли впечатления, диагностика болезней или детские игры. Интересно, что результат интегрирования (определенный интеграл) является не чем иным, как математическим ожиданием. Вспомним, что больные шизофренией испытывают серьезные затруднения с определением вероятности тех или иных событий.

Представляется, что основное нарушение, ведущее к столь драматичным для личности больного последствиям, при шизофрении сводится к проблемам «досознательного» вычисления мозгом простейших сигналов среды. Изменения восприятия больного сводятся к тому, что вычисляется не отношение синуса к косинусу, а **версинус** (отрезок CD) как относящийся к оси ОЕ и лежащий за пределами того пространства, что отделяет источник сигнала от организма. Если обычный синус и косинус – это отношения, то эта функция – расстояние. Главное значение в этой конструкции имеет вектор: если отношение синуса к косинусу направлено к центру координат, то версинус оторван от центра координат и направлен в другую сторону. Производная синуса равна косинусу (т.е. расстоянию от предмета до человека в нашем примере), а производная версинуса – синусу (т.е. самому предмету наблюдения). Геометрический смысл дифференцирования синуса указывает на движение синуса по часовой стрелке по комплексной площади. Таким образом, проблема вычисления производных единичных сигналов при шизофрении ведет к разрыву пространства между воспринимаемым сигналом и собственным организмом, нарушает верные, естественные соотношения между сигналами среды и человеком.

Изложенное подтверждается: 1) значительно более редким, нежели в норме, употреблением больными глаголов как частей речи, характеризующих действие, состояние, отношение, ритм или выразительность [2]; 2) трудностями любого выбора, совершаемого больным в обыденной

жизни; 3) сопоставлением особенностей восприятия больными иллюзий Понцо и Поггендорфа. На начальном этапе шизофрении больные менее подвержены иллюзии, точнее (!) здоровых определяют истинные геометрические размеры отрезков и их соотношения. При иллюзии Поггендорфа (модиф. Джастроу) достоверных различий в чувствительности между психически здоровыми испытуемыми и больными шизофренией ни в одном из случаев сравнения не установлено [3]. Объяснение – в иллюзии Поггендорфа меняется пространственное взаимоотношение графических элементов в композиции, что позволяет больным верно определять искомый угол (изменяющиеся прямые в тесте служат подсказкой). В иллюзии же Понцо предъявляемая фигура состоит из 4 неподвижных пространственно разделенных линий. Таким образом, больные шизофренией до перехода болезни в хроническую стадию точнее здоровых определяют геометрические размеры простейших неподвижных отрезков и точнее соотносят их между собой.

Мышление оперирует не непосредственно сенсорными сигналами, а ощущениями, образами и словами. Но и ощущения, и образы, и слова возможны, только если есть сигналы, передающие в мозг информацию об изменениях внешней или внутренней среды организма. В математике есть термин, объединяющий всё, чем оперирует человек в процессе мышления. Это множества. Как из звуков складывается слово, так из ощущений, заданных нам безусловными и выработанными рефлексами, возникает множество ощущений, тактильных, проприоцептивных, зрительных, слуховых, обонятельных и прочих, формирующих нашу самоидентификацию как обособленного физического организма и личности. Несчетный комплекс запомненных в прошлом и распознаваемых ежесекундно распределений сенсорных сигналов составляет множество образов, которыми человек оперирует каждый момент своей жизни. Не будет преувеличением сказать, что всё составляющее человека как думающее существо есть операции с распознаваемыми каждый миг и извлекаемыми из памяти множествами. Все мы всё, что делаем по жизни, это распознаем с помощью дискретного языка непрерывные изменения среды, выделяя их из аналогового мира (т.е. определяем производные), вне сознания относим их к некоему множеству (т.е. определяем первообразные) и сравниваем, сопоставляя множества и их элементы уже в поле своего сознания. Распознавание множеств или их элементов, сравнение между собой или с иными множествами и объединение в результате в некие иные множества составляет существо мышления.

Неправильное распознавание множеств при шизофрении вызывается ошибкой в интегрировании признаков простейших сигналов, которое позволяет из хранимых в памяти образов выделить нужное множество. Вспомним, что французский математик Анри Лебег понимал интеграл как меры множеств [4]. Нарушение интегрирования при-

знаков вызывается ошибками чрезмерно частой дифференциации (версинус бесконечно дифференцируем). Операции же с самими уже ошибочно или безошибочно распознанными множествами, манипуляции с ними, мозг больных выполняет безупречно.

Представляется, что роль высших отделов коры головного мозга в патологии шизофрении преувеличена. Первичные признаки сенсорных сигналов обрабатываются на уровне самих органов чувств и ствола мозга. И лишь операции с уже распознанными множествами передаются для дальнейшей обработки в высшие отделы мозга. В основных сенсорных системах организма (зрение и слух) начальным звеном обработки сигналов являются природные фильтры – высоких и низких частот (далее ФВЧ и ФНЧ соответственно). Для зрения: магноцеллюлярные ганглиозные клетки сетчатки, ответственные за низкие пространственные (высокие временные частоты), и парвоцеллюлярные, ответственные за высокие пространственные (низкие временные частоты). Для слуховой системы – волосковые клетки. ФВЧ по своей природе – дифференцирующие, а ФНЧ – интегрирующие фильтры. Избыточная, чрезмерная работа ФВЧ в ущерб оптимальной деятельности ФНЧ – основное патогенное нарушение при шизофрении. Известно, что правому полушарию мозга приписывают главенствующую роль в индукции – обработке сигналов от общего к частному, а левому в дедукции – от частного к общему. Представляется, что правое полушарие больных перегружено из-за неверной обработки сенсорных сигналов в нижележащих отделах нервной системы, а левое – не загружено по этой же причине.

В математике под отношением понимают, во сколько раз первое число (числитель) меньше второго (знаменатель). При этом для жизнедеятельности любого организма значение имеет именно расстояние до наблюдаемого объекта (cos на рисунке). Ничтоже сумняшеся, подражая известной фразе Л.Н. Толстого («Человек подобен дроби, числитель ее то, что он есть, а знаменатель то, что он о себе думает»), выведем соотношение, математически характеризующее личность как сплав биологического и социального. Личность подобна отношению запомненной самоидентификации к его текущей самоидентификации (далее ЗСИ и ТСИ). ЗСИ – это информация, которую человек помнит о себе из социальной и биологической области. По сути, это запомненная совокупность множеств – образов, отождествляемая памятью с конкретным организмом. ТСИ создают ощущения, формирующиеся как осознаваемой, так и неосознаваемой и ежесекундно обновляющейся информа-

цией от органов чувств человека. ТСИ позволяет выделить «себя» из среды как некую целостность, существующую в единственном экземпляре. Нарушенная сенсорная стимуляция ведет к ошибкам самоидентификации. Для личности (с любой психопатологией или без нее) в соотношении более значим знаменатель. Это ярко видно при шизофрении. Больной недоумевает, разбираясь в своих ощущениях и рассуждая рационально, убеждая больше самого себя, что он не учился в спецшколе, не умеет пользоваться оружием, не служил в армии – как же у него возникло отождествление себя с неким неизвестным ему наемником и диверсантом, сотрудником силовых структур? В приведенном примере больной распознает себя как бывшего «силовика», отождествляет себя с «не своей» личностью под влиянием неосознаваемой сенсорной стимуляции. ТСИ свойственна всему живому, по крайней мере тем, кто эволюционно выше крокодила, с той лишь разницей, что у животных нет дискретизирующего внешнюю реальность словесного мышления.

Нейробиологи университета Женевы (UNIGE) установили различие в обработке мозгом двух последовательных звуковых сигналов, предъявляемых с разницей во времени в 500 мсек – у больных шизофренией активность мозга ко времени прихода второго сигнала не угасала [5]. Повторный сигнал, отстоящий от первого на 500 мсек, можно рассматривать как модель отраженного единичного импульса, а повышенную активность нервной системы больных на него – как подтверждение идеи о шизофрении как настройке сенсорной системы больных на особое восприятие отраженных звуковых сигналов. Подобные выводы должны иметь перспективу для излечения больных, их реальной сенсорной реабилитации: повторные (отраженные) звуковые сигналы лишь следует сделать «плохими» для организма, инструментально обучив нервную систему больного правильному восприятию звуков.

## Литература

1. Чуприкова Н.И. Психика и психические процессы. М.: Знак, 2015. Гл. 16.
2. Карякина М.В. и др. Нарушения речи у больных шизофренией // Социальная и клиническая психиатрия. 2017. Т. 27, № 4. С. 93–99.
3. Шошина И.И. и др. Функциональные особенности магноцеллюлярной и парвоцеллюлярной систем при шизофрении // Экспериментальные исследования в психологии. 2014. Т. 7, № 4. С. 77–87.
4. Лебег А. Интегрирование и отыскание примитивных функций. М.; Ленинград: ГТТИ, 1934. С. 38.
5. How our brain filters sounds // eNeuro. September 6. 2019.

# Определение индивидуальных особенностей пик-волновых разрядов с помощью реализации алгоритма расчёта взаимной информации по сигналам магнитоэнцефалограмм

Д.А. Лачинова<sup>1</sup>, G. van Luijtelaar<sup>2</sup>, P. Ossenblock<sup>3</sup>, И.В. Сысоев<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
email: lachinova-dasha@yandex.ru

<sup>2</sup>Centre for Cognition, Universiteit Nijmegen, Nijmegen, Netherlands; email: g.vanluijtelaar@donders.ru.nl

<sup>3</sup>Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Netherlands; email: paulyossenblok@live.com

<sup>4</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, email: ivssci@gmail.com

В настоящее время эпилепсия является серьезным и достаточно широко распространенным заболеванием в мире – по классификации международной лиги по борьбе с эпилепсией (ILAE) ею страдают 1–2 % людей в мире [1].

В современном мире усилился интерес к изучению протекания абсансной эпилепсии [2]. Интенсивную работу в этом направлении проводят наши коллеги из Нидерландов P. Ossenblock и G. van Luijtelaar. Генерализованные пик-волновые разряды с частотой около 3–4 Гц, сформированные вследствие нарушения функций таламокортикальной системы, считаются признаком абсансной эпилепсии [2]. Детская абсансная эпилепсия – одна из наиболее распространенных форм генерализованной детской эпилепсии. Эта форма определяется ежедневными абсансами продолжительностью 4–30 с, но чаще всего менее 10 с [3].

Изучение данного заболевания традиционно проводится на животных-моделях, таких как крысы линий WAG/Rij и GAERS, поскольку они позволяют производить хирургические вмешательства и записывать сигналы глубоких структур мозга.

При работе с пациентами-людьми лучшими данными являются записи магнитоэнцефалограмм (МЭГ), поскольку череп практически не искажает магнитное поле в отличие от электрического, и есть более детальное разрешение по коре головного мозга. Магнитоэнцефалография (МЭГ) – метод регистрации электромагнитных полей (ЭМП), возникающих в результате протекания в головном мозге электрических токов. Данный способ наиболее эффективен для точного определения внутримозговой локализации эпилептических очагов и генераторов различных компонентов вызванных потенциалов и ритмов ЭЭГ и уже более 30 лет используется для диагностики эпилепсии [4]. С точки зрения современных требований персонализированной медицины следует понимать, что у каждого пациента характеристики протекания разрядов могут быть очень индивидуальны и даже отличаться от разряда к разряду, и важно это учитывать при диагностике и лечении.

Поскольку эпилептиформная активность традиционно считается результатом синхронизации различных областей мозга – в случае абсансной эпилепсии это таламокортикальная сеть, – анализ связности между областями мозга является важнейшим средством изучения функциональных

механизмов эпилепсии, чему и посвящено настоящее исследование.

В качестве экспериментальных данных используются записи магнитоэнцефалограмм людей, содержащие пик-волновые разряды при абсансной эпилепсии. Данные записывались с поверхности коры головного мозга с теменной (P – parietal), затылочной (O – occipital), лобной (F – frontal), центральной (C – central) и височной (T – temporal) областей (рис. 1). В нашем распоряжении имелись девять 122-канальных магнитоэнцефалограмм пациента длиной 5 минут каждая. На них нам удалось выделить 6 приступов длительностью более 4 секунд с наиболее выраженной эпилептической активностью.

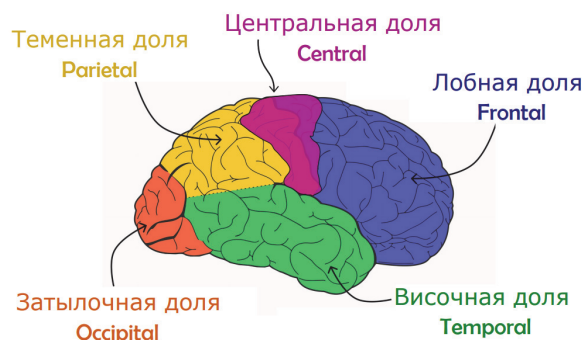
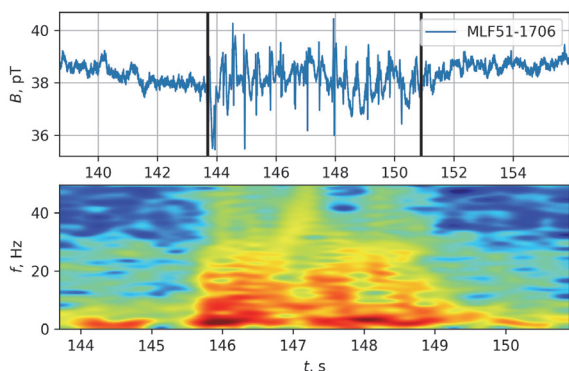


Рис. 1. Области коры больших полушарий для записи магнитоэнцефалограмм: теменная, лобная, центральная, затылочная и височная доли

Поскольку ожидается, что в течение первой секунды SWD (Spike Wave Discharges) происходит динамическое изменение коркового распространения, также ожидается, что в этом интервале будет заметное изменение частоты. Использование частотно-временного анализа подходит для наблюдения за изменением частоты с течением времени. Частотно-временной анализ с помощью преобразования Фурье – оптимальный подход для оценки спектральной плотности сигналов МЭГ [5].

Преобразование Фурье позволяет перейти от рассмотрения сигналов во временной области к их анализу и обработке в частотной области. Данный метод осуществляет разложение сигнала на ряд гармонических составляющих (синусоидальных и/или косинусоидальных) последовательно возрастающего ряда частот. Каждая гармоника определяется тремя параметрами: амплитудой, начальной фазой и частотой. Зависимость амплитуды и фазы гармоник от частоты называется спектром.



**Рис. 2.** Временной ряд (вверху) и спектрограмма (внизу) пик-волнового разряда для записи № 3 (канал MLF51 – левая фронтальная кора). Вертикальными линиями на серии обозначены начало и конец приступа. По горизонтальной оси указано время в секундах, по вертикальной – индукция магнитного поля в пТ и частота в Гц

На основе спектрального анализа (рис. 2) обнаружили, что в течение всего разряда ритмическую эпилептическую активность можно считать достаточно устойчивой. В высших гармониках есть просветы. Преиктальный период можно выделить четким началом. На последних секундах наблюдаем быстрое разрушение ритмической активности в таламокортикальной цепи и окончание разряда.

Большое число значимых результатов в области исследования абсансной эпилепсии определено с помощью использования достаточно простых нелинейных мер. В нашей работе мы использовали в качестве такой меры функцию взаимной информации.

Функция взаимной информации между двумя выборками – это популярная мера выявления связанности экспериментальных данных [6]. Если две переменные независимы, взаимная информация между ними ноль. Если два канала сильно зависят, например один составляет часть второго, то взаимная информация между ними велика. Есть и другие интерпретации взаимной информации, например информация, хранящаяся в одной переменной о другой переменной, или степень предсказуемости второй переменной при знании первой. Теперь хорошо известно, что взаимная информация измеряет общую зависимость, в то время как корреляционная функция измеряет линейную зависимость.

Существуют несколько подходов к расчёту функции взаимной информации. Мы использовали современный подход [6, 7], основанный на учёте ближайших соседей и предъявляющий наименьшие требования к объёму данных, что важно при исследовании нестационарных по природе физиологических сигналов. Взаимная информация может быть получена путем оценки энтропий Шеннона  $H(X)$ ,  $H(Y)$  и  $H(X, Y)$ :

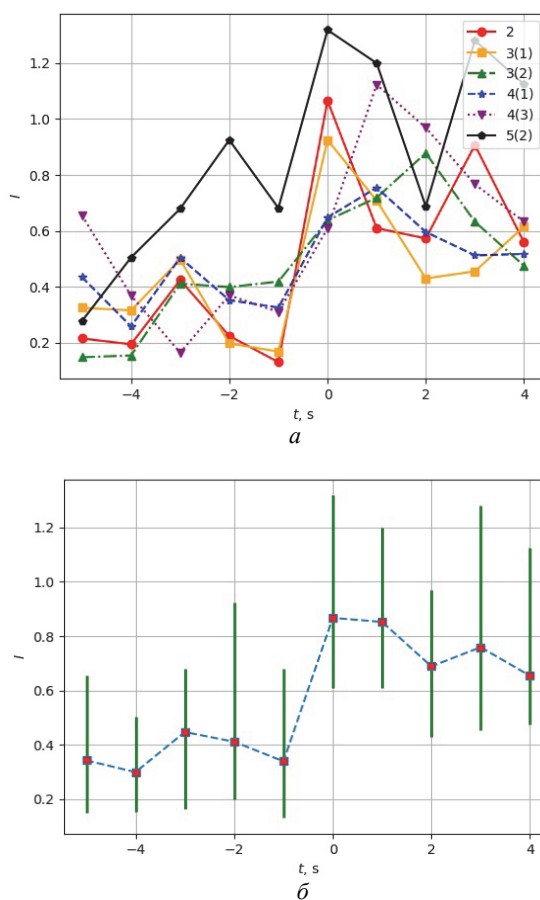
$$I(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y). \quad (1)$$

Формула для вычисления оценки функции взаимной информации, которая использовалась для написания алгоритма:

$$I_{x,y} = \psi(N) + \psi(1) - \left\langle \psi(n_x(i) + 1) + \psi(n_y(i) + 1) \right\rangle_{i=1, \dots, N}, \quad (2)$$

где  $N$  – длина выборки,  $n_x(i)$  и  $n_y(i)$  – число соседей  $i$ -й точки на плоскости  $(X, Y)$ ,  $\psi(n)$  – дигамма-функция.  $X$  и  $Y$  в нашем случае представляют собой определенные каналы магнитоэнцефалограмм.

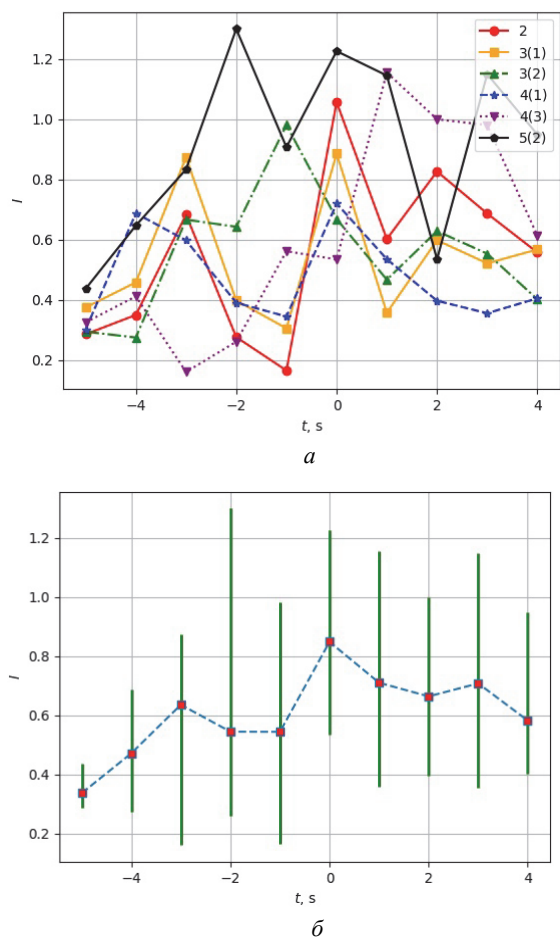
Существуют внутрислошарные и межполушарные связи. Внутрислошарные связи интересны тем, что они достаточно хорошо изучены на крысах [8], и в данном исследовании мы показали, что у людей картина распределения разряда при абсансном эпилептическом статусе на магнитоэнцефалограмме повторяется (рис. 3, а). Межполушарные связи (рис. 4, а) на генетических моделях животных изучены хуже по причине того, что считается, что абсансная эпилепсия – первично генерализованная форма у людей и животных [9].



**Рис. 3.** Полученные значения функции взаимной информации для всех 6 приступов внутрислошарных связей MLF11–MLF51, построенных с использованием различных цветов и маркеров (а). По горизонтальной оси указано время в секундах, по вертикальной – полученные значения взаимной информации. Планки погрешностей внутрислошарных связей MLF11–MLF51 (б) показывают минимумы и максимумы, которые помогают дать представление об индивидуальной вариабельности

В ходе данного исследования мы обнаружили четкие границы начала и конца пик-волнового разряда абсансной эпилепсии. Наблюдалось увеличение взаимной информации во время преик-





**Рис. 4.** Полученные значения функции взаимной информации для всех 6 приступов межполушарных связей MLF11–MRF11, построенных с использованием различных цветов и маркеров (а). По горизонтальной оси указано время в секундах, по вертикальной – полученные значения взаимной информации. Планки погрешностей внутриполушарных связей MLF11–MRF11 (б) показывают минимумы и максимумы, которые помогают дать представление об индивидуальной вариабельности

тального периода, а затем уменьшение на 2–4 секундах приступа, т.е. имеется динамика взаимной информации как до, так и во время приступа. Тем не менее этот процесс отличается для различных разрядов во времени (рано или поздно) и по амплитуде, что было также обнаружено в исследовании на крысах линии WAG/Rij [8].

### Литература

1. Scheffer I.E., French J., Hirsch E., Jain S., Matheron G.W., Moshé S.L., Perucca E., Tomson T., Wiebe S., Zhang Y.-H. and Zuberi S.M. Classification of the epilepsies: New concepts for discussion and debate : Special report of the ILAE Classification Task Force of the Commission for Classification and Terminology // *Epilepsia Open*. 2016. Vol. 1. P. 37–44; doi:10.1002/epi4.5.
2. Вольнова А.Б., Ленков Д.Н. Абсансная эпилепсия: механизмы гиперсинхронизации нейронных ансамблей // *Медицинский академический журнал*. 2012. Т. 12, № 1. С. 3–15.
3. Петрухин А.С. Детская неврология : учебник : в 2 т. Т. 2. М. : ГЭОТАР-Медиа, 2018. 560 с.
4. Rose D.F., Smith P.D., Sato S. Magnetoencephalography and epilepsy research // *Science*. 1987. Vol. 238, Issue 4825. P. 329–335; doi: 10.1126/science.3310234.
5. Диканев Т.В. Спектральный анализ сигналов: учебно-методическое пособие для студентов нано- и биомедицинских технологий. Саратов, 2011. 24 с.
6. Kraskov A., Stögbauer H., Grassberger P. Estimating mutual information // *Physical Rev. E*. 2004. Vol. 69. Art. 066138.
7. Сысоев И.В. Сравнение численных реализаций алгоритма расчёта взаимной информации на основе учёта ближайших соседей // *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2016. Т. 24, № 4. С. 86–95.
8. Syssoeva M.V. Dynamics of directional coupling underlying spike-wave discharges // *Neuroscience*. 2016. Vol. 314. P. 75–89; doi: 10.1016/j.neuroscience.2015.11.044.
9. Depaulis A., van Luijckelaar G. Genetic Models of Absence Epilepsy in the Rat // *Models of Seizures and Epilepsy* / Editors: Pitkänen A., Schwartkroin P.A., Moshé S.L. Elsevier, 2006. P. 233–238.

# Графы, сети, лапласианы, кривизна Риччи и все такое

Н. Макаренко

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург

То, куда мы идем, есть то, как мы туда идем.

*Роберт Фриш*

Любой мозг – это сеть. Любой разум – это сеть.

Разум – это гиперсеть мозга.

*Константин Анохин*

К сожалению, мы до сих пор не слишком преуспели в попытках понять самих себя [1–3]. Может быть, поэтому в последнее время стали особенно популярны поиски подходящих инструментов для моделирования функций мозга в разделах дискретной математики и математической физики (см., например, [1, 4, 5]). Интересным аналогом служит эконофизика, которая появилась в результате заимствования инструментов теоретической физики: термодинамического рынка Адама Смита [6], броуновских спекуляций Луи Башелье [7], квантовой физики и калибровочных полей как моделей фондового рынка [8, 9]. В обоих этих случаях мы имеем дело с исключительно сложными (во времени и пространстве) нелинейными системами, обладающими свойствами рефлексии. Так, *технический анализ* Доу в финансах потерял эффективность после его широкого применения для диагностики рядов рыночных индексов. Агенты рынка сами формировали сценарии рыночных показателей использованием этого анализа. Мы наблюдаем похожие эффекты в мимикрии «ответов» мозга под наши вопросы: они обычно содержат желаемый ответ [3]. Следует заметить, что заимствования формализма из других областей знания ограничены его зависимостью от родного контекста, который почти не пересекается по множеству исходных атрибутов с идеями когнитивных моделей. Поэтому нередко такой формализм становится только *метафорой* описания, но не методами анализа в нейронауке. Например, в физике дифференциальные уравнения описывают изменения измеримых функций в координатах и времени. Правилами хорошего тона является выполнение теоремы существования и единственности решения. Для обратных задач, восходящих к Кеплеру (законы движения планет из наблюдений, восстановление знаний из таблиц данных), требуются *догмы реконструкции*, которые выражают «кредо идеального экспериментатора» [10]. Примером догмы является вера, что наши наблюдения *детерминированно порождены* неизвестной динамической системой как *типичная* проекция фазовых траекторий ее низкоразмерного аттрактора на первую координату мира наблюдателя. Если наделять аттрактор комфортными свойствами, то реконструкцию топологических копий аттрактора прямо из временных рядов можно получить алгоритмом Такенса с точностью «до гримасы клоуна» и предположения о типичности. Обратимся к ког-

нитивному контексту. Известны попытки использовать хаотическую динамику в нейрофизиологии (см., например, [11]), где измеренные биофизические ряды рассматриваются как *наблюдаемые* по Такенсу. Однако у нас нет оснований полагать, что мозг описывается системой с Большим аттрактором. Мы еще слишком далеки от когнитивных аналитических моделей, если даже верить, что такие модели существуют, вопреки парадоксу Пенроуза. Разумно считать, что модель играет роль *правильно заданного вопроса* для *ответов*, которыми являются наши наблюдения. Однако мы до сих пор плохо понимаем, что такое *вопрос* для мозга. Являются ли наши попытки общения с корой при изучении, скажем, непроизвольного внимания с помощью измерений ЭЭГ, ФМРТ, ПЭТ или МЭГ диалогом с *мозгом*? Можно ли использовать наблюдаемые паттеры этих измерений для составления некоторой *грамматики* «разговора с корой»? Как убедиться, что это действительно *когнитивное общение*, а не простое отражение нашего вопроса как реакция стола на теннисный шарик [2, 3]? Активные эксперименты с нашими ощущениями, например импульсное воздействие переменных полей (Жак д'Арсонваль, 1896 г.), привели к открытию фосфенов, зрительных галлюцинаций, которые легли затем в основу методов транскраниальной магнитной стимуляции. Интеллектуальный анализ таких экспериментов до сих пор отсутствует. С другой стороны, фантомы реинкарнации, полученные с помощью ЛСД [12], перинатальных матриц и холотропного дыхания Станислава Грофа [13] пока напоминают попытки установить контакт с мыслящим Океаном в «Солярисе» Станислава Лема.

*Может ли существовать алгоритм, позволяющий диагностировать возникновение «диалога» с мозгом на основе упомянутых экспериментов?* Путь к ответу, возможно, начинается со способов кодирования наблюдаемой пространственной сложности нейронных изображений. Это должны быть план, схема, граф или симплициальный комплекс, аппроксимирующие в некотором конструктивном смысле наблюдаемые связи, паттерны этой сложности. Так, для описания активности коры отметим некоторые интересные «точки» – островки активности, кластеры, которые могут содержать разное число нейронов в зависимости от выбранного разрешения. Можно просто отмечать момент активности каждой связи на оси

времени. Таким вариантом была клеточная сеть Винера и Розенблота для описания динамики сердца [14, 15]. В общем случае глобальное поле активности кодируется мгновенным снимком – *snapshot* – конфигурацией связей между выделенными маркерами коры. Эволюция активности перестраивает граф и приводит к *графодинамике*; этот термин был предложен Марком Айзерманом [17]. Собственно эта конструкция, многократно озвученная Константином Анохиным в его докладах, и вынесена в эпиграф. Наиболее общей концепцией графодинамики, включающей семиотику и способность к вычислениям, является, по-видимому, *акторно-сетевая теория* Бруно Латура и его коллег. Впервые графы (сети) использовал Эйлер в задаче о кенинсбергских мостах, хотя сама идея восходит к древним картам созвездий и генеалогическим деревьям Средневековья. Британский математик Тимоти Гауэрс писал в своем эссе [18]: «...базовый объект – граф – может быть объяснен и понят за пять минут... Совершенно не обязательно читать много литературы перед тем, как приступить к решению конкретной задачи – важно знать некоторые базовые техники, но интересные проблемы остаются нерешенными как раз потому, что эти техники к ним применить не удастся».

Цель настоящего доклада – рассказать, как можно создать удобный математический интерфейс теории графов, используя методы дискретной римановой геометрии и вычислительной топологии, как построить сам граф по медицинскому изображению методами *manifold learning*. Уже появились первые работы по графодинамике когнитивных нейросистем [1, 5, 18, 19]. Для количественного описания перестройки графа удобно использовать спектры дискретного оператора Лапласа [1, 18] и операторов Ходжа – Лапласа [20, 21], которые позволяют вычислять гомологии дыр [22]. Однако самым интересным дескриптором является дискретная кривизна графа. Существующие алгоритмы позволяют считать на ребрах графа кривизну Риччи – Формана, Оливье – Формана или глобальную гиперболичность Громова. Большой прикладной потенциал этого интерфейса обусловлен отчасти тем обстоятельством, что дискретная кривизна Риччи позволяет выделять критические режимы в динамике распределенной системы и положительно коррелирует с ее энтропией Больцмана [23, 24]. В докладе будут приведены примеры, иллюстрирующие упомянутые техники.

## Литература

1. Анохин К.В. Когнитом: в поисках фундаментальной нейронаучной теории сознания // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2021. Т. 71, № 1. С. 39–71.
2. Хардинг Д.Е. Как я был без головы // Глаз разума. Самара : Бахрам-М, 2003.
3. Яхно В.Г., Макаренко Н.Г. // Подходы к моделированию мышления / ред. Редько В.Г. М. : Ленанд, 2016.
4. Mathematics, theoretical physics and mathematical methods of data analysis in neuroscience. URL: <https://siriusmathcenter.ru/program/003s>. (26.07–03.08.2021).
5. Chung M.K. Brain Network Analysis. Cambridge : Cambridge Univ. Press, 2019.
6. Сергеев В.М. Пределы рациональности. Термодинамический подход к теории экономического равновесия. М. : Фазис, 1999.
7. Bachelier L. Théorie de la speculation // Ann. Sc. de l'É.N.S. 3e série. 1900. V. 17. P. 21–86.
8. Эконофизика. Современная физика в поисках экономической теории / ред.: Харитонов В.В., Ежова А.А. М. : МИФИ, 2007.
9. Pinski K. Gauge geometry of financial markets // J. Phys. A: Mathematical and General. 2000. V. 33, № 1. Art. L5.
10. Афраймович В.С., Рейман А.М. Размерность и энтропия в многомерных системах // Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М. : Наука, 1989.
11. Рабинович М.И., Моезинову М.К. Нелинейная динамика мозга: эмоции и интеллектуальная деятельность // УФН. 2010. Т. 180. С. 371–387.
12. Налимов В.В., Дрогалова Ж.А. Вероятностная модель бессознательного. Бессознательное как проявление семантической вселенной // Психологический журнал. 1984. Т. 5, № 6. С. 111–122.
13. Гроф С., Гроф К. Холотропное дыхание. М. : Ганга, 2018.
14. Винер Н., Розенблот А. Проведение импульсов в сердечной мышце // Кибернетический сборник. 1961. Т. 3. С. 3–56.
15. Wiener N., Wintner A. The discrete chaos // Amer. J. Math. 1943. V. 65, № 2. P. 279–298.
16. Гауэрс У.Т. Две культуры в математике. URL: [http://mathcenter.spb.ru/nikaan/misc/Two\\_cultures.pdf](http://mathcenter.spb.ru/nikaan/misc/Two_cultures.pdf).
17. Айзерман М.А. и др. Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики). II // Автомат. и телемех. 1977. Вып. 9. С. 123–136.
18. Pospelov N., Nechaev S. et al. Spectral peculiarity and criticality of a human connectome // Physics of life reviews. 2019. V. 31. P. 240–256.
19. DasGupta B. et al. How did the shape of your network change? (on detecting network anomalies via non-local curvatures // Algorithmica. 2020. V. 82. P. 1741–1783.
20. Torres J.J., Bianconi G. Simplicial complexes: higher-order spectral dimension and dynamics // Journal of Physics: Complexity. 2020. V. 1, № 1. Art. 015002.
21. Lee H. et al. Hole detection in metabolic connectivity of Alzheimer's disease using k-Laplacian // International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. Cham : Springer, 2014. P. 297–304.
22. de Silva V., Ghrist R. Homological sensor networks // Notices Amer. Math. Soc. 2007. V. 54, № 1. P. 10–17.
23. Chatterjee T. et al. Detecting network anomalies using Forman–Ricci curvature and a case study for human brain networks // Scientific reports. 2021. V. 11, № 1. P. 1–14.
24. Sandhu R.S., Georgiou T.T., Tannenbaum A.R. Ricci curvature: An economic indicator for market fragility and systemic risk // Science Advances. 2016. V. 2, № 5. Art. e1501495.



# Особенности динамики мозговых процессов при выполнении когнитивных заданий различной сложности

А.А. Меклер<sup>1</sup>, Е.П. Станкова<sup>2</sup>, В.А. Шмыров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет; email: mekelr@yandex.ru

<sup>2</sup>ИЭФБ РАН; email: stankova.ekaterina@yandex.ru

<sup>3</sup>СПбГУ; v.shmyrov@spbu.ru

В докладе представлены два экспериментальных исследования, направленных на изучение влияния сложности выполняемого задания на системные мозговые процессы. С этой целью оценивались системные и информационные характеристики сигналов электроэнцефалограммы (ЭЭГ), зарегистрированной во время выполнения заданий различной сложности. Исследования различались характером выполняемых заданий. В одном из них испытуемые выполняли задание отслеживания множества объектов (Multiple Objects Tracking, MOT), а в другом – задания, используемые для проведения теста Кагана. Для каждого из экспериментов было проведено предварительное исследование, в котором был отобран и калиброван по сложности стимульный материал. Кроме того, были проведены исследования и сделаны математические и программные разработки для вычисления интересных характеристик электроэнцефалограмм.

В рамках первого исследования проведён психофизиологический эксперимент, направленный на изучение системных характеристик мозговой активности при выполнении заданий MOT. В эксперименте осуществлялась запись сигналов ЭЭГ во время выполнения испытуемыми заданий MOT различных уровней сложности. Полученные данные – сигналы ЭЭГ – после предварительной обработки (удаление артефактов, частотная фильтрация) были обработаны методами нелинейной динамики – вычислены их системные и информационные характеристики. Вычислялись величины фрактальной и корреляционной размерностей ( $D_0$  и  $D_2$ ), энтропия, сложность Лемпеля – Зива. После этого была проведена статистическая обработка полученных величин. Результаты показали, что при увеличении сложности задания практически все меры сложности ЭЭГ также показывают рост.

При проведении второго исследования в качестве стимульного материала использовались зада-

ния, аналогичные заданиям теста Кагана. После предварительного отбора заданий для исследования был проведён психофизиологический эксперимент, аналогичный предыдущему – изучались системные характеристики мозговой активности во время выполнения указанных заданий различных уровней сложности. Как и в предыдущем случае, полученные сигналы ЭЭГ прошли такую же предварительную обработку. После этого были вычислены их системные и информационные характеристики (те же, что и в эксперименте MOT) и проведена статистическая обработка полученных величин. Результаты показали, что при увеличении сложности задания происходят сильные изменения системных характеристик мозговой активности. Однако, в отличие от предыдущего случая, эти изменения разнонаправлены в разных отведениях регистрации ЭЭГ. Это говорит о том, что в данном эксперименте при увеличении сложности выполняемого задания происходит существенная перестройка системной организации мозговых функциональных систем, выражающаяся в разнонаправленности изменений характеристик системных процессов в зависимости от локализации.

Если сравнивать с результатами предыдущего эксперимента (где изменения были в своей массе однонаправлены), то можно предположить, что, поскольку в данном случае усложнение задачи приводит к увеличению времени её выполнения, на мозговую активность начинает оказывать влияние не только сложность выполняемого задания. Здесь начинают играть роль также такие процессы, как утомление по мере его выполнения, а также мотивационная составляющая, благодаря которой испытуемые выполняют задание с большей или меньшей тщательностью, что опять-таки находит отражение во временных затратах.

Исследование поддержано грантом РФФИ № 18-013-0108.

# Этанол-зависимая функциональная система со свойствами дискретного временного квазикристалла

Ю.В. Никонов

ФГБУЗ МСЧ № 59 ФМБА России

Ранее нами [4] было показано, что временные закономерности становления ремиссии алкоголизма как динамики этанол-зависимой функциональной системы (ЭЗФС) можно рассматривать как взаимодействие двух подсистем в рамках нелинейных динамических систем по типу модели «хищник – жертва» с затуханием.

Еще в 2012 году Фрэнк Вильчек предложил концепцию кристаллов времени и квантовых кристаллов времени. Вскоре выяснилось, что вполне возможно спонтанное нарушение дискретной временной трансляционной симметрии («квантовый дискретный временной кристалл»; «дискретный временной кристалл») в случае регулярного постороннего воздействия на нелинейную динамическую систему. Регулярное постороннее воздействие – оно же периодическое возмущение с использованием более высокочастотных, чем у самой системы – временных гармоник [7–9], может индуцировать образование «временных квазикристаллов», которые представляют собой отрезки временной оси с нарушением дискретной временной трансляционной симметрии и параметром порядка, квантово-подобными свойствами, отличными от свойств «истинных» кристаллов времени.

Исходные для наших построений данные получены на основе применения теста – «измерения» интенсивности патологического влечения к алкоголю (ПВА) [5] в динамике становления ремиссии алкогольной зависимости. По мнению М.Ф. Тимофеева, у больного алкоголизмом (по МКБ –10: психические расстройства и расстройства поведения, вызванные употреблением алкоголя – F 10.2) формируется ЭЗФС (ЭЗФС – частный случай функциональной системы по П.К. Анохину), которая запускается в действие как экзогенными, так и эндогенными рилизинг-факторами. Рилизинг-фактор (запах паров алкоголя) является одним из наиболее значимых раздражителей для ЭЗФС. Наличие и интенсивность влечения к алкоголю выявляется рядом опросников, тестом кратковременного (2–3 с) воздействия парами этанола на обонятельный анализатор. М.Ф. Тимофеев [5] выявлял периоды риска рецидива у больных с алкогольной зависимостью на ранних этапах становления ремиссии, используя методику изучения реакции сосудов головного мозга на запах алкоголя среди больных алкоголизмом мужчин (запойная форма, средняя прогрессивность) в возрасте от 30 до 48 лет. Контрольная и основная группы были обследованы методами реоэнцефалографии, самоотчета. На каждой реоэнцефалограмме (РЭГ) записывали фоновую кривую и рассчитывали коэффициент межполушарной асимметрии ( $K'_{ac}$ ), который вычисляется по формуле  $K'_{ac} =$

$= (A_6 - A_m/A_m) \cdot 100 \%$ , где  $A_6$  – амплитуда реограммы на стороне, где реографический индекс больше, а  $A_m$  – амплитуда реограммы на стороне, где реографический индекс меньше (используется способ регистрации первой производной РЭГ) [6]. Затем проводили функциональную пробу с запахом алкоголя и вновь записывали РЭГ с расчетом тех же параметров (ежедневно в первые 10 дней, в последующем – только через 1–2 дня (что важно) до 66 дня ремиссии). Изменения  $K'_{ac}$  после функциональной нагрузки фиксировались и сравнивались с показателями при фоновом исследовании в процентах. По основной группе результаты исследования были представлены в виде ( $K_{ac}$ ) – отношения  $K'_{ac}$  при функциональной пробе к  $K'_{ac}$  при фоновом исследовании (в процентах) в зависимости от времени (дня воздержания от алкоголя). У больных алкогольной зависимостью из контрольной группы  $K'_{ac}$  при фоновом исследовании равнялся  $0,408 \pm 0,012$ . После функциональной пробы с запахом алкоголя он уменьшался до  $0,301 \pm 0,012$  (35,5 %).

В результате такого измерения возможна активация заинтересованных нейронных сетей с актуализацией ПВА и соответствующее изменение психического и соматического состояния больного. Считается, что ПВА представлено совокупностью многоуровневых компонентов: аффективными, вегетативными, идеаторными и поведенческими [1]. В исследовании М.Ф. Тимофеева актуализации ПВА соответствует увеличение коэффициента межполушарной асимметрии, отражающее неравенство кровоснабжения (и неравенство активации соответствующих нейронных сетей ЭЗФС) полушарий головного мозга. Именно роль самой процедуры наблюдения с помощью ежедневного, производимого в одно и то же время 1 раз в сутки воздействия паров этанола, которая может менять сам результат, отличает эту модель от модели «хищник – жертва». Возможно, этим – ролью процедуры «наблюдения» (воздействия рилизинг-фактора) – паров этанола и объясняется практическое отсутствие в литературе данных о периодах колебания интенсивности патологического влечения к алкоголю ААС и раннего периода становления ремиссии АЗ, обнаруженных М.Ф. Тимофеевым.

Периоды максимальной чувствительности к запаху этанола (нечетные периоды, они же «периоды риска» рецидива алкоголизма) приходятся на исходный день (нулевой день воздержания от алкоголя) (I период), 2–3-й дни (III период), 7–8-й дни (V период), 19–21-й день (VII период) и 45–50-й дни (IX период) –  $K_{ac}$  соответственно 253, 120, 95 и 80 %. Периоды минимальной чувствительности к запаху алкоголя (четные периоды)

приходятся на 2-й день (II период), 4–5-й дни (IV период), 12–13-й дни (VI период), 30–32-й дни (VIII) и 62–66-й дни (X период) ремиссии –  $K_{ac}$  соответственно 95, 65, 50, 39 и 37 %. Получена кривая с волновым режимом колебаний, с уменьшением показателей этой кривой как по амплитуде, так и по частоте [5].

В своей статье М.Ф. Тимофеев делает чисто практические выводы о необходимости учета периодов риска в лечении больных алкогольной зависимостью, никак не комментируя полученные им эмпирически числовые закономерности, не делая их теоретического анализа. Между тем обращает на себя внимание, что сроки смены (в днях) I–VII периодов становления ремиссии точно соответствуют ряду чисел Фибоначчи: 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 [3, 4]. Сроки смены VIII–X периодов составляют соответственно 32, 50, 66 дней против чисел ряда Фибоначчи – 34, 55, 89.

Далее представим ряд значений  $K_{ac}$  в виде

III А) 2,53; 1,20; 0,95; 0,79; 0,80;

В) 0,95; 0,65; 0,50; 0,39; 0,37.

I; II; III; IV; V; VI; VII; VIII; IX; X

Числовой ряд (IIIА) отражает состояние «алкогольной» «нечетной» подсистемы  $a$ , так как соответствует актуализации ПВА при воздействии паров этанола. Ряд (IIIВ) соответствует отсутствию ПВА – состоянию «подсистемы ремиссии» «четной» подсистемы  $p$ .

Если маркировать периоды (нечетные) максимальной чувствительности к запаху алкоголя (они же «периоды риска» срыва становления ремиссии) знаком « $\rightarrow$ », то получим ряд ( $I^*$ ), который почти точно соответствует ряду Фибоначчи  $\Phi_n$ , расширенному в сторону отрицательных значений аргумента  $n$ . Причем для нечетных  $n$  члены последовательностей  $\Phi_n$  и  $\Phi_{-n}$  совпадают, для четных они противоположны по знаку:

$I^* 1; -1; 2; -3; 5; -8; 13; -21 \dots$

Эту закономерность для четных членов ряда Фибоначчи (в нашем случае – точек перехода в периоды неустойчивого состояния) можно интерпретировать как возможность прохождения этих временных точек и без актуализации влечения к АО и появления риска возобновления алкоголизации.

Анализ числовых данных показал, что колебания значений  $K_{ac}$  определяет длительность периодов  $T$  (с первого по восьмой) становления ремиссии алкогольной зависимости I–VII по формуле  $T_{I-VII} = 2\pi/(w_i w_j)1/2$ , где  $w_i$  и  $w_j$  соответственно значения  $(K_{ac})^2$  периодов I и II, III и IV, V и VI, VII и VIII и являются в системе «хищник – жертва» положительным коэффициентом прироста (жертв) и положительным коэффициентом вымирания (хищников) [5]. «Хищник» и «жертва» – условно количество нейронов нейронных сетей двух взаимодействующих подсистем – подсистемы  $a$  и подсистемы  $p$ .

Вне рамок модели «хищник – жертва» осталась роль функциональной асимметрии, в которой смене свойства наличия-отсутствия ПВА соответствует смена симметрии биообъекта (в нашем

случае – смена симметрии ЭЗФС в виде динамики  $K_{ac}$  как пример энантиоморфной реакции). В рамках функциональной биосимметрии энантиоморфным реакциям соответствует динамика метрико-топологических свойств индивидуального пространства-времени организма [2, 3]. Частным случаем такой динамики и является квантовый дискретный временной квазикристалл – представление отрезков временной оси с нарушением дискретной временной трансляционной симметрии и параметром порядка под воздействием регулярного постороннего воздействия – оно же периодическое возмущение с использованием более высокочастотных, чем у самой системы, временных гармоник.

Именно периодическое ежедневное воздействие (1 раз в сутки в одно и то же время) задает частоты ответных реакций (с кратными суткам ответными реакциями) с измерением коэффициента асимметрии ( $K_{ac}$ ) при воздействии паров этанола в первые 10 дней (далее в исследовании измерения проводились через 1–2 дня, что, возможно, и стало причиной отклонения длительности периодов от ряда Фибоначчи после 21 суток). Квазикристалл демонстрирует меньшую частоту, демонстрируя спонтанное нарушение симметрии дискретной временной трансляции, и, следовательно, полученное состояние является дискретным квазикристаллом времени (ДКВ) [7]. Важно, что ДКВ предлагается использовать для выполнения топологически защищенных квантовых вычислений [10–12]. В частности, давно предложены топологические квантовые вычисления с помощью «плетения», создания кос квазичастиц – анионов Фибоначчи, «живущих» в двух пространственных и одном временном измерении [10, 11].

В статье рассмотрена возможность интерпретации временных закономерностей динамики ЭЗФС в процессе алкогольного абстинентного синдрома и раннего периода становления ремиссии алкогольной зависимости, полученных при ежедневном воздействии на человека с АЗ паров этанола как дискретных временных квазикристаллов с закономерностями ряда Фибоначчи. Вполне вероятно, что формирование закономерностей дискретных волновых квазикристаллов в рамках динамики ЭЗФС, то есть получение при регулярном ежедневном воздействии внешнего стимула через анализаторы (обонятельный, звуковой, зрительный, тактильный) на нейросети головного мозга, происходит и в рамках динамики иных функциональных систем; в этом контексте возможен новый взгляд на часть ранее проведенных экспериментальных работ в области нейрофизиологии.

## Литература

1. Антропов Ю.А. и др. Некоторые аспекты патологического (зависимого) влечения при алкоголизме // Вопросы наркологии. 2014, № 1. С. 121–132.
2. Брагина Н.Н., Доброхотова Т.А. Функциональные асимметрии человека. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Медицина, 1988. – 240 с.
3. Дубров А.П. Симметрия биоритмов и реактивности: (Пробл. индивидуал. различий, функций. биосимметрика). – М.: Медицина, 1987. – 175 с.

4. Никонов Ю.В. О закономерностях становления ремиссии алкогольной зависимости в контексте модели «хищник – жертва» // Сознание и физическая реальность. 2010. Т. 15, № 2. С. 16–21.
5. Тимофеев М.Ф. Периоды риска у больных алкоголизмом на ранних этапах ремиссии и противорецидивная иглотерапия // Вопр. наркологии. 1992. № 1. С. 35–38.
6. Яруллин Х.Х. Клиническая реоэнцефалография. – М., 1983. – 271 с.
7. Autti S., Eltsov V.B., Volovik G.E. Observation of time quasicrystal and its transition to superfluid time crystal // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. Art. 215301.
8. Giergie Krz., Miroszewski A., Sacha Krz. Time crystal platform: from quasi-crystal structures in time to systems with exotic interactions. 2017. arXiv:1710.10087v3.
9. Flicker F. Time Quasicrystals in Dissipative Dynamical Systems. 2017. arXiv:1711.03119v1.
10. Lahtinen V., Pachos J.K. A Short Introduction to Topological Quantum Computation // SciPost Phys. 2017. V. 3. Art. 021.
11. Trebst S., Troyer M., Wang Z., Ludwig A.W.W. A short introduction to Fibonacci anyon models // Prog. Theor. Phys. Supp. 2008. V. 176. P. 384.
12. Bomantara R.W., Gong J. Simulation of non-Abelian braiding in Majorana time crystals // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. Art. 230405.

# Опыт анализа сглаженных кардиоинтервалограмм при стрессе

М.В. Никулина<sup>1,2</sup>, В.А. Антоненц<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород; email: nikamarathon@gmail.com

## Введение

Самое широкое распространение при использовании вариабельности ритма сердца (ВРС) для диагностических и прогностических целей в настоящее время получили спектральные (мощность частотных диапазонов HF, LF, VLF и производные от них показатели) и статистические характеристики кардиоинтервалограмм (КИГ) [1]. Однако интегральные показатели не отражают временной организации ритма сердца (РС) и практически не позволяют выделять эпизоды прямого модулирования компонент ритма [2]. Непериодические сигналы имеют непрерывный частотный спектр с частотно-зависимой спектральной плотностью, и, исследуя РС в частотной области (спектральные показатели вариабельности), нелегко получить и практически невозможно количественно оценить уникальные времена физиологических откликов.

В нашей работе на основе временного анализа ВРС оцениваются времена периодических и непериодических изменений РС в момент острого стресса, детектированного с помощью информационно-телекоммуникационной технологии событийно-связанной телеметрии сердца [3]. Медленные и быстрые компоненты КИГ разделены методом сглаживания кардиоинтервалограмм [2], который использует предположение о наличии иерархии времен, соответствующих различным

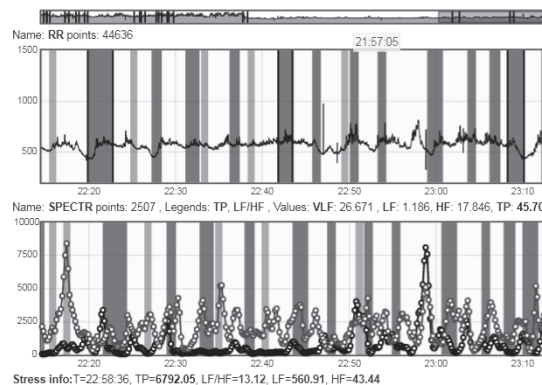


Рис. 1. Кардиоритмограмма с выделенными интервалами острого стресса и расчетными спектральными показателями вариабельности ритма сердца с интернет-ресурса StressMonitor на базе www.cogni-nn.ru [3]

механизмам влияния на сердечный ритм. Для визуализации процессов изменения длительности кардиоциклов используется известный в нелинейной динамике псевдофазовый портрет.

## Методы

Посредством интернет-ресурса StressMonitor на базе www.cogni-nn.ru были детектированы эпизоды острого стресса, имевшего место в процессе кардиомониторинга спортсмена-марафонца

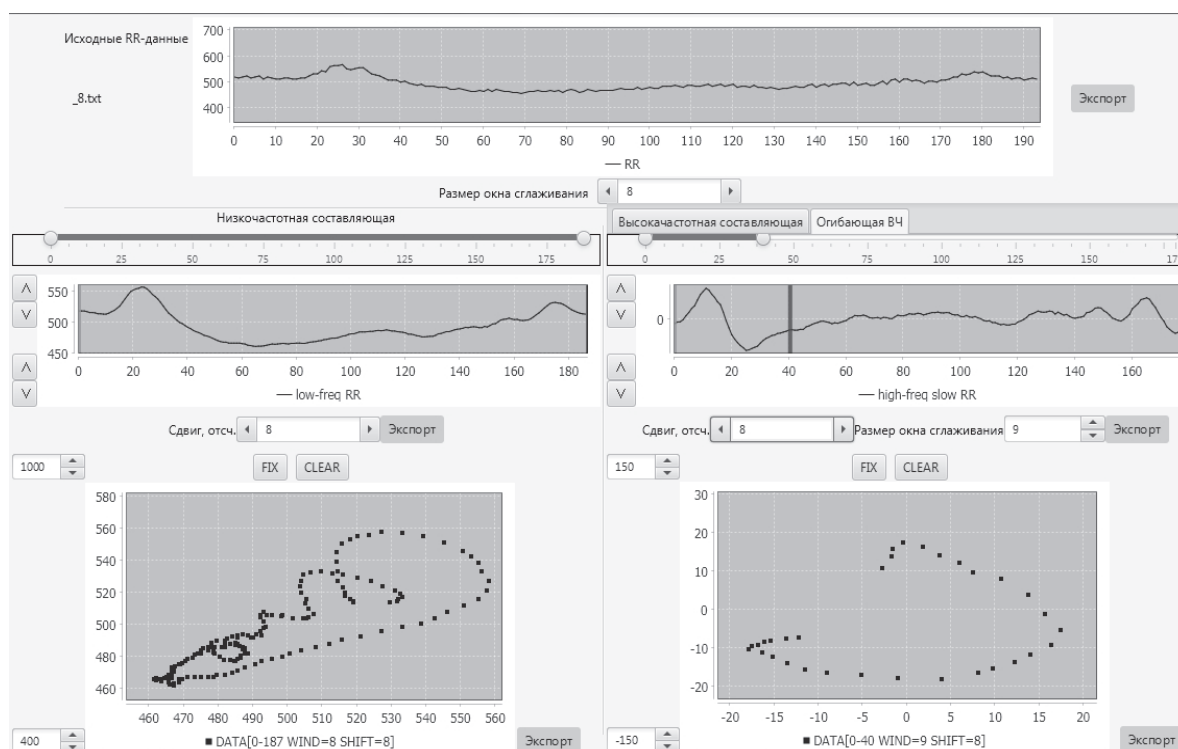


Рис. 2. Инструменты для декомпозиции исходного ряда RR-интервалов на три выборки:  $RR_{VLF}$ ,  $RR_{LF}$ ,  $RR_{HF}$

(рис. 1). Данная технология позволяет в прозрачном режиме (без привлечения внимания обследуемого и какого-либо ограничения его подвижности) непрерывно, до 150 часов, записывать электрокардиосигнал в условиях естественной деятельности человека. Данные в виде ряда RR-интервалов передаются на сервер, где реализуется спектральный анализ ритмограммы методом дискретного преобразования Фурье для неравномерных сигналов. Спектр делится на диапазоны: VLF (0,003–0,040 Гц), LF (0,04–0,15 Гц), HF (0,15–0,4 Гц). Вычисляется общая мощность спектра  $TP = VLF + LF + HF$  и симпато-вагусный баланс LF/HF. На основании трехкомпонентной теории нейрохимических механизмов стресса [4] реализуется детектирование начала стресса по падению общей мощности спектра variability сердечного ритма (TP) на фоне резкого возрастания индекса симпато-вагусного баланса (LF/HF) [3].

Там же, на сайте, по соотношению между функциональными резервами организма и текущим напряжением регуляторных систем рассчитывается уровень адаптационного риска (УАР) [1].

Соответствующие эпизодам стресса отрезки ритмограммы были выделены и отсортированы нами по уровню адаптационного риска. Эти отрезки использовались как входные данные для программы RR-«разведки» RRecon (рис. 2).

Программа RRecon реализует простой метод декомпозиции КИГ на медленную ( $RR_L$ ) и быструю ( $RR_H$ ) компоненты элементарным усреднением последовательности в скользящем окне с размером менее половины количества отсчетов, сумма длительностей которых равна времени медленной регуляции [2]. Окно скользящего среднего здесь – фильтр низкой частоты. Сглаживанием удаляются быстрые изменения сигнала для выявления медленных трендов.

Если рассматривать  $RR_L$ ,  $RR_H$  как независимые сигналы, которым соответствуют разные спектры, упоминаемые в стандарте [5], то к каждому из этих сигналов может быть применена теорема Парсеваля [6], согласно которой интеграл квадрата функции равен интегралу квадрата ре-

зультата примененного к ней преобразования Фурье. Поэтому для оценки ВСП процедуру преобразования Фурье без потери качества оценки можно заменить процедурой усреднения [2]. Размах полученных рядов  $RR_{VL}$ ,  $RR_H$  характеризует интенсивность медленного и быстрого регулирования. Аналогично, усреднение в скользящем окне применяется к полученному ряду  $RR_H$  с моделированием фильтра средней частоты.

Для исследования временной структуры КИГ программа визуализирует портреты в псевдофазовом пространстве. Каждый портрет строится из пар значений ( $RR_n, RR_{n+S}$ ) соответствующей последовательности RR-интервалов, отстоящих друг от друга на  $S$  отсчетов, как говорят, с лагом  $S$ . Реализована возможность изменения смещения  $S$  (лага) через интерфейс пользователя. Такие портреты позволяют четко различать виды аperiodического режима системы, а также определять период интервальной периодической динамики [7].

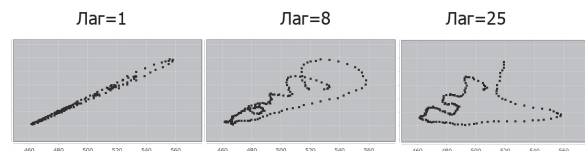


Рис. 3. Изменение формы скатерограммы с изменением лага

При сдвиге, равном единице, картина приобретает вид классической скатерограммы (корреляционной ритмограммы). В процессе работы изыскивались методические принципы выделения частот ВСП по графикам сглаженного ряда RR-интервалов и фазовым портретам.

## Результаты

Интерфейс RRecon позволяет независимо изменять ширину окон сглаживания нативной КИГ и ее высокочастотной компоненты, менять лаги псевдофазовых портретов, ограничивать размер визуализируемой выборки. Все это обеспечивает комфорт для визуального анализа траекторий портретов (рис. 2).

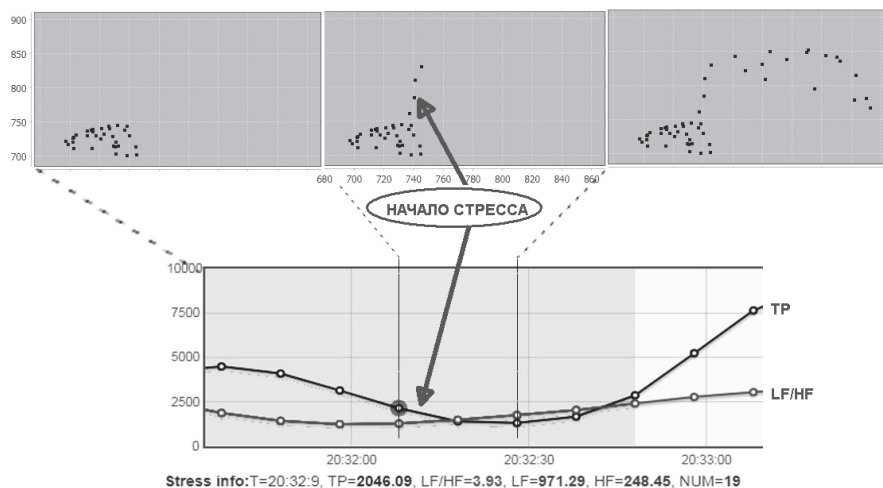


Рис. 4. Паттерн скатерограммы, соответствующий началу стресса

Изменение величины сдвига  $S$  и разумных границ отрезка наблюдения позволило графически вычленивать нестационарные колебания. При изменении лага через интерфейс программы мы наблюдаем изменение формы псевдофазового портрета. Из вытянутой по диагонали обычно применяемой скатерограммы (при  $S = 1$ ) кривая разворачивается, наполняется, становится округлой. При дальнейшем увеличении сдвига кривая ложится горизонтально, когда его значение сравняется с четвертью периода (рис. 3). Таким образом, имея величину периода колебания в количестве RR-интервалов (лаг), мы можем перевести его в секунды. Величина лага  $S$  при горизонтальном положении причинной траектории служит множителем расчета частоты колебания:  $f = \frac{1}{4 \cdot S \cdot \overline{RR}}$ , где  $\overline{RR}$  – среднее арифметическое RR-интервалов рассматриваемого отрезка КИГ.

Как пример ниже представлены некоторые частоты адаптационных реакций, распознанные на соответствующих отрезках исходной КИГ ( $УАР = 8$ ) по псевдофазовому портрету для низких частот (НЧ) на рис. 2. В частности, на участке  $RR_{14-102}$  наблюдается затухающее колебание  $f = 0,02$  Гц (овал вытянут и заострен).

Отрезок RR	Частота, Гц
5–33	0,067
14–102	0,020
31–71	0,017
101–135	0,065

При увеличении размера скользящего окна усреднения из портрета элиминируются относительно более высокочастотные элементы.

Формальное сопоставление присущей началу стресса динамики [3] и псевдофазовых портретов сглаженных КИГ на более чем 30 эпизодах решением прямой и обратной задачи позволило выявить характерное поведение скатеротраектории (центральная часть рис. 4). Наблюдается резкое изменение корреляции в начале стресса. Достаточность данного графического признака требует дальнейшего изучения.

Рисунок 5 демонстрирует ригидизацию сердечного ритма с увеличением УАР и изменение частотной наполненности при развитии стресса. Интересно в дальнейшем проследить динамику псевдофазового портрета согласно трехкомпонентной теории стресса [4], проследить волны Майера, миогенный ритм, респираторную аритмию, разнообразные локальные ответы СР [8].

## Заключение

Визуальный анализ траекторий (см. рис. 2) позволил без использования «тяжелых» расчетных методов, таких как дискретное преобразование Фурье или сингулярный спектральный анализ, выделить локальные закономерности в поведении временных рядов.

Предложенный простой метод [2] позволил осуществить декомпозицию кардиоинтервалограммы на медленную и быструю компоненты.

Анализ псевдофазового портрета разрешает точно выявлять частоту изменения КИГ, что может быть использовано для биоуправления [9].

## Литература

1. Методы и приборы космической кардиологии на борту Международной космической станции : монография / Баевский Р.М., Фунтова И.И., Берсенева А.П. и др. ; ред. Баевский Р.М., Орлов О.И. – М. : Технофера, 2016. – 368 с. – ISBN 978-5-94836-462-9.

2. Антонец, В.А. Применение сглаживания кардиоинтервалограмм для анализа variability сердечного ритма / В.А. Антонец, С.П. Пермяков, М.В. Никулина // Вариабельность сердечного ритма: теоретические аспекты и практическое применение в спорте и массовой физической культуре // Тез. докл. Всерос. конф. (25–26 мая 2021). – Ижевск : УдГУ, 2021.

3. Event-Related Telemetry of Heart Rate for Personalized Remote Monitoring of Cognitive Functions and Stress under Conditions of Everyday Activity / S.A. Polevaya, E.V. Eremin, N.A. Bulanov [et al.] // Modern Technologies in Medicine. – 2019. – V. 11, № 1. – P. 109–115. – DOI: 10.17691/stm2019.11.1.13.

4. Парин, С.Б. Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюцион-

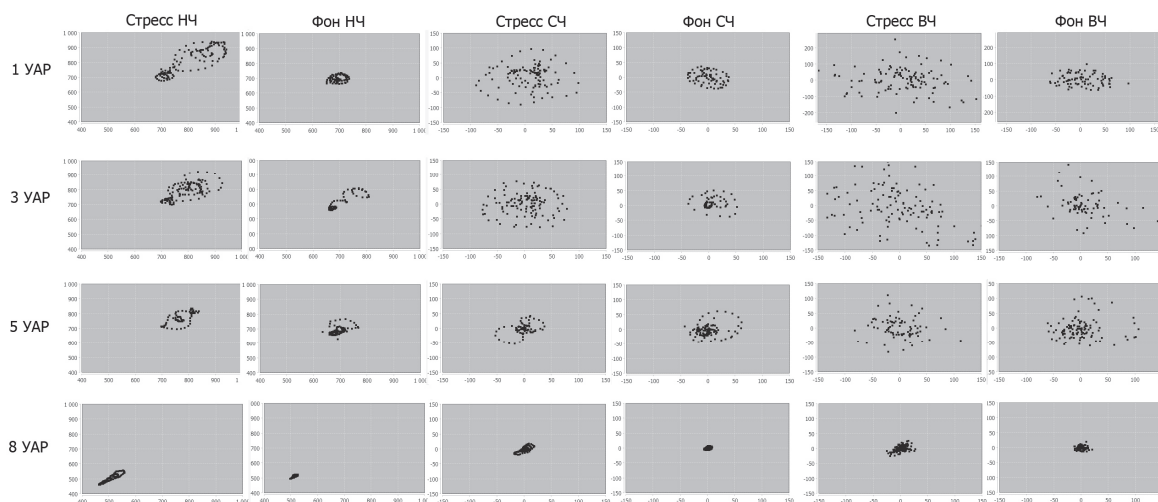


Рис. 5. Результат декомпозиции исходного ряда RR-интервалов на три выборки:  $RR_{НЧ}$ ,  $RR_{СЧ}$ ,  $RR_{ВЧ}$  для некоторых значений УАР при наличии и отсутствии стресса

ный аспект / С.Б. Парин // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Психология. – 2008. – Т. 2, № 2. – С. 118–135.

5. Вариабельность сердечного ритма. Стандарты измерения, физиологической интерпретации и клинического использования // Вестник аритмологии. – 1999. – № 11. – С. 53–78.

6. Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях : в 2 т. / Ж. Макс ; пер. с франц. – М. : Мир, 1983. – Т. 1. – 312 с.

7. Шлюфман, К.В. Особенности динамических режимов одномерной модели Рикера / К.В. Шлюфман, Б. Е. Фишман, Е.Я. Фрисман // Известия высших учебных

заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2012. – Т. 20, № 2. – С. 12–28. – DOI: 10.18500/0869-6632-2012-20-2-12-28.

8. Гриневич, А.А. Математические модели в сердечно-сосудистой системе человека. Подходы к описанию колебаний с частотой 0,1 Гц variability ритма сердца и магистрального кровотока / А.А. Гриневич // Регионарное кровообращение и микроциркуляция. – 2018. – Т. 17, № 4(68). – С. 11–23. – DOI: 10.24884/1682-6655-2018-17-4-11-23.

9. Демин, Д.Б. Физиологические основы методов функционального биоуправления / Д.Б. Демин, Л.В. Поскотина // Экология человека. – 2014. – № 9. – С. 48–59.



# Автоматическая сегментация опухоли по оптоакустическим ангиографическим изображениям на основе сверточной нейронной сети U-net

И.В. Нуйдель<sup>1</sup>, В.В. Перекатова<sup>1</sup>, А.А. Тельных<sup>1</sup>,  
А.В. Хиллов<sup>1</sup>, И.А. Зимин<sup>2</sup>, И.В. Турчин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород  
email: nuidel@ipfran.ru

<sup>2</sup>ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

## Введение

Оптоакустическая (ОА) ангиография оптического или акустического разрешения – это современный метод биомедицинской визуализации [1–3], часто используемый для визуализации ангиогенеза опухоли в приложениях для исследования рака [4]. Метод оптоакустики основан на генерации ультразвуковых волн при засветке биоткани короткими лазерными импульсами. Лазерное освещение на длине волны 532 нм вместе с широкополосным ультразвуковым детектированием (>100 МГц) позволяет проводить высококонтрастную трехмерную визуализацию гемоглобинсодержащих структур размерами ~ 1–1000 мкм на миллиметровой глубине. Однако из-за большого количества трехмерных данных, полученных с помощью современных систем растрового оптоакустического сканирования [5–6], полученные изображения сосудистой сети трудно анализировать визуально.

Эта проблема особенно актуальна для мониторинга неоангиогенеза экспериментальных опухолей, кровеносные сосуды которых имеют тенденцию быть меньше и более извилистыми по сравнению с сосудистой сетью здоровой ткани. Неоангиогенез относится к процессу развития сосудистой сети, заключающемуся в росте новых капилляров из существующих кровеносных сосудов, который играет важную роль в раннем развитии опухоли. На ранней стадии роста опухоли сосуды мгновенно диффундируют, в результате чего образуются многочисленные неупорядоченные сосудистые ветви с произвольным направлением. Для эффективного мониторинга роста опухоли [7, 8] необходимо четко определить границу нормальной и опухолевой ткани, что особенно актуально для биомедицинских приложений. Таким образом, разработка алгоритмов сегментации опухоли на основе ОА-данных является ключом к характеристике состояния исследуемой ткани.

Сегментация изображения часто затруднена из-за низкого контраста, шума и других экспериментальных факторов. На УЗИ-изображениях артефакты связаны с затуханием, спекл-шумом или затенением, что может привести к отсутствию границ [9]. Эффективной сегментации изображений в мультиспектральной ОА-томографии также препятствует относительно низкий внутренний контраст больших анатомических структур и границ тканей [10]. Одно из возможных решений состоит в применении активных контурных моделей для сегментации изображений, которые в даль-

нейшем использовались для улучшения качества изображения за счет учета различий в скорости звука и затухании освещенности [11].

Методы, основанные на глубоком обучении, все чаще используются для обработки медицинских изображений за последние два десятилетия благодаря их хорошей производительности при классификации, особенно в случае предварительной обработки (например, конструирование и восстановление) и сегментации [12].

В области ОА-визуализации эти методы применялись для идентификации раковых образований с помощью кластеризации  $k$ -средних и изучения признаков текстурных участков [13], а также для поддержки векторной машинной классификации локальных признаков [14].

Сверточные нейронные сети (CNN), основанные на архитектуре U-net, были использованы для удаления артефактов полосового типа и шума на ОА-изображениях [15–17], восстановления начального распределения давления [18] или картирования степени насыщения кислородом и распределение хромофоров по мультиспектральным ОА-изображениям, подверженным зависящему от длины волны затуханию освещенности [19]. Количественная оценка хромофоров была предпринята с помощью оценки освещенности методом случайного леса, обученным с использованием контекстных изображений на основе вокселей [20]. CNN, основанные на архитектурах AlexNet и VGG-16, использовались для локализации точечных объектов и удаления артефактов отражения из изображений [21, 22], а алгоритм обучения K-SVD использовался для исправления сгенерированных артефактов по множественным отражениям в черепе мыши [23]. Для обработки сигналов открытого доступа также были предложены специализированные алгоритмы на основе глубоких нейронных сетей. Например, полносвязная пятиуровневая сеть использовалась для увеличения полосы пропускания сигнала [24]. Кроме того, на основе CNN разрабатываются итеративные алгоритмы реконструкции с оценкой качества на каждом этапе реконструкции [25].

В данной работе мы предлагаем использовать сверточную нейронную сеть CNN на основе архитектуры U-net [26] для сегментации изображений, полученных на недавно разработанной ОА-системе. Большое количество сегментированных вручную изображений ОА использовалось для эффективного обучения сети, эффективность работы которой оценивалась путем вычисления коэффи-

циента Соренсена – Дайса (Sorensen–Dice coefficient), используемого в статистике для оценки близости двух объектов [27]. В нашем случае это разница между автоматически сегментированным и сегментированным вручную изображениями.

### Материалы и методы

Экспериментальные данные были получены на установке для оптико-акустической (ОА) ангиографии, аналогичной [28]. Используемая ультразвуковая антенна на основе 25 мкм пленки ПВДФ [29] с центральной частотой 35 МГц обеспечивала продольное/поперечное пространственное разрешение 38/50 мкм. В качестве источника зондирующего оптического излучения использовался импульсный лазер Wedge HB532 (Bright Solutions, Италия), работающий на длине волны 532 нм, с частотой повторения импульсов 2 кГц, длительностью импульса 1 нс и энергией в импульсе 0,2 мДж. Сканирование производилось в области  $10 \times 10$  мм с шагом 25 мкм в двух направлениях –  $X$  и  $Y$ . Время получения одного трехмерного изображения составляло  $\sim 5$  мин. К полученным экспериментальным ОА ангиографическим изображениям была применена двумерная реконструкция методом синтеза апертур, реализованная в частотной области последовательно в направлениях  $XZ$  и  $YZ$ .

Были получены экспериментальные ОА-изображения моделей опухолей с относительно высокой васкуляризацией [30].

Модель опухоли представляла собой подкожную мышечную колоректальную карциному (СТ26), выращенную на 19 мышах Balb/c. ОА-визуализацию и *in vivo* мониторинг проводили через 7 дней после инокуляции опухолевых клеток в течение 3 дней. Объем опухоли в этот день составлял  $50 \pm 18$  мм<sup>3</sup>. На время ОА-сканирования мышам применялась анестезия изофлурановым газом. Все эксперименты на животных проводились в соответствии с протоколом № 6 от 17 апреля 2019 г. Этического комитета Приволжского исследовательского медицинского университета (Нижний Новгород, Россия).

### Формирование набора данных

Для обработки были предоставлены ОА-изображения опухоли с разной глубины в виде стека, содержащего 281 изображение для каждого подопытного животного из восьмидесяти (рис. 1, *a*). Трехмерный стек показан на рис. 1, *б*. Далее для данных по одному животному суммированием по набору изображений, начиная от поверхностных слоев в глубину (281, 271, 261 и т.д. с шагом 10), было получено 21 интегральное изображение, где визуализируются интересующие нас области. Пример интегрального изображения приведен на рис. 1, *a*. На изображении визуально определяются структуры кровеносных сосудов подкожных слоев и опухолевые области. Всего для обработки для исследования получено 1680 ОА-изображений здоровых и пораженных тканей экспериментальных животных.

Изображения были размечены экспертом. По данным разметки построены бинарные маски, локализирующие положение патологических областей на изображении (рис. 2).

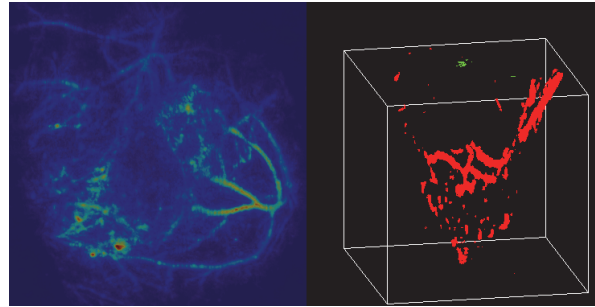


Рис. 1. Интегральное ОА-изображение, суммирующее несколько ОА-изображений последовательных слоев из одного экспериментального стека (*a*); трехмерная реконструкция ткани по набору ОА-изображений из стека (*б*)

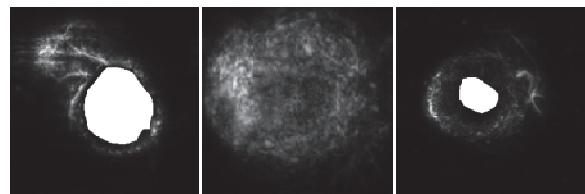


Рис. 2. Примеры ОА-изображений и масок к ним (наложенные на ОА-изображения белые области)

### Обработка изображений

Для задачи сегментации Optoacoustic Microscopy Angiography images адаптирована программная модель нейронной сети U-net [26], архитектура которой приведена на рис. 3. Данная сеть производит двухклассовую классификацию исходной картинки на области, где нет опухоли (норма), и патологические опухолевые области.

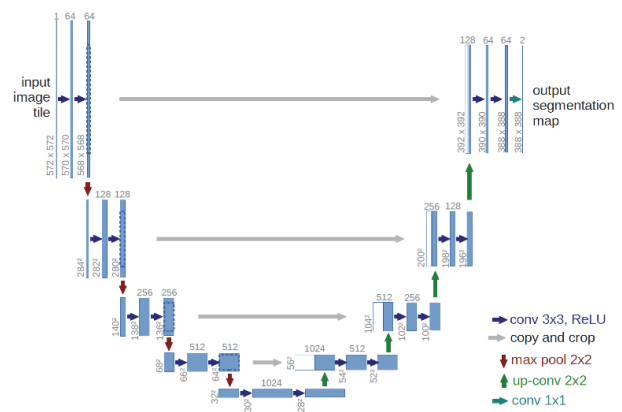


Рис. 3. Архитектура используемой CNN (U-net с остаточным подключением) [26, 31]. Число, написанное над каждым слоем, обозначает количество ядер (каналов) свертки, которое равно количеству изображений в каждом слое. Цифры обозначают размер изображений (размеры блоков в весовых матрицах), который остается постоянным в каждой строке. Длинные горизонтальные стрелки указывают прямые соединения с последующим объединением или суммированием для самой верхней стрелки

Для обучения и тестирования работы модели использованы наборы ОА-изображений и их маски, примеры которых даны на рис. 4. Слева направо приведены исходные изображения, рядом – их маски, полученные в ходе ручной разметки.

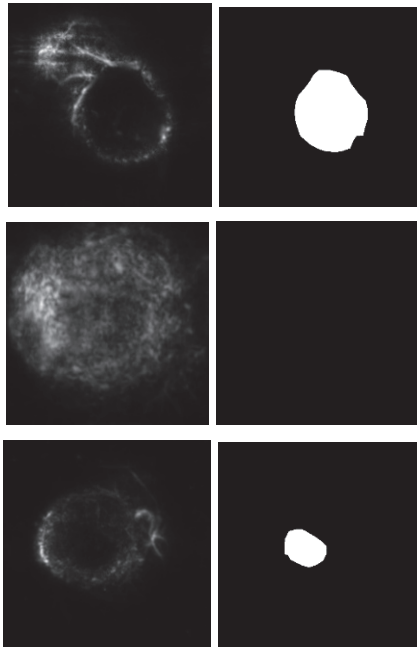


Рис. 4. Примеры ОА-изображений из набора train\_images и масок к ним train\_masks

Нейронная сеть U-net в процессе работы с данными учится автоматически создавать маску. Используется функция потерь (Loss), с помощью которой сравнивается выход сети с соответствующими масками, и возвращается ошибка сети. Таким образом получается информация о том, в каких местах сеть ошибается. Параметры сети в процессе подстраиваются таким образом, чтобы функция потерь уменьшалась.

Как функция потерь обычно для нейронных сетей по обработке изображений используется коэффициент Dice Coefficient (мера близости множеств), который определяется следующим образом:

$$\text{Dice}(X, Y) = \frac{2|X \cap Y|}{|X| + |Y|}. \quad (1)$$

$X$  является нашим предсказанием, а  $Y$  – правильно размеченной маской на текущем объекте.  $|X|$  означает мощность множества  $X$  (количество элементов в этом множестве) и  $\cap$  для пересечения между  $X$  и  $Y$ . Ниже на графиках результат  $\text{Dice}(X, Y)$  умножен на 100.

Также в процентах оценивается точность предсказания Accuracy, которая рассчитывается по формуле (2), где num\_correct – это количество пикселей всех изображений в батче, отнесенных к верному классу (0 – точка из области изображения, где нет патологии, 1 – точка изображения, принадлежащая опухоли, которая согласно правильному предсказанию должна принадлежать множеству точек маски); num\_pixels – это количество пикселей всех изображений в батче.

$$\text{Accuracy}(X, Y) = \frac{\text{num\_correct}}{\text{num\_pixels}} \cdot 100. \quad (2)$$

Для оценки качества предсказания рассчитывалась среднеквадратичная ошибка предсказания по тестовой выборке из  $n$  элементов MSE (mean squared error). Предсказание тем лучше, чем меньше MSE.

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (Y - X)^2. \quad (3)$$

$X$  является нашим предсказанием, а  $Y$  – правильно размеченной маской на текущем объекте.

### Результаты и обсуждение

На модифицированной модели U-net [32] была проведена серия вычислительных экспериментов.

На рисунке 5 слева направо приведены исходное ОА-изображение, маска и результат предсказания на обученной модели.

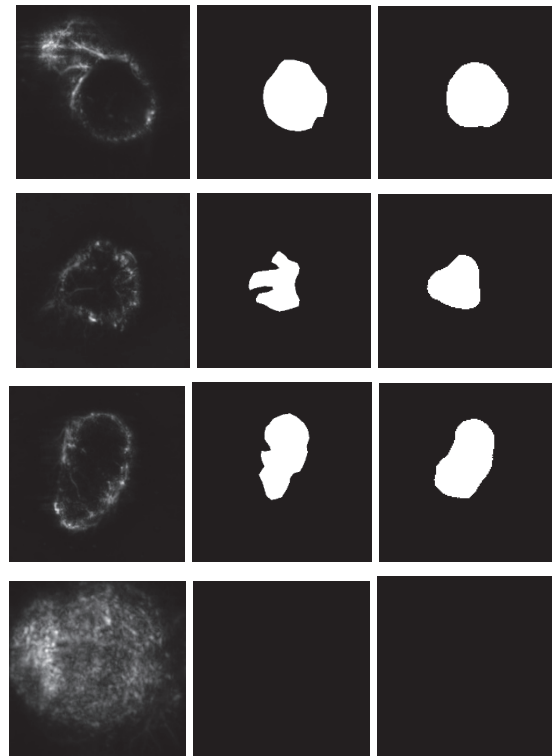


Рис. 5. Исходные изображения, размеченные маски, предсказанные маски

Была проведена серия вычислительных экспериментов с целью выявления параметров, влияющих на качество предсказания. Было проведено предобучение модели на наборе данных 5088 изображений автомобилей с последующим обучением на данных ОА изображений. Менялся размер батча (16 изображений, 32 изображения в батче), количество эпох обучения (200 эпох, 400 эпох).

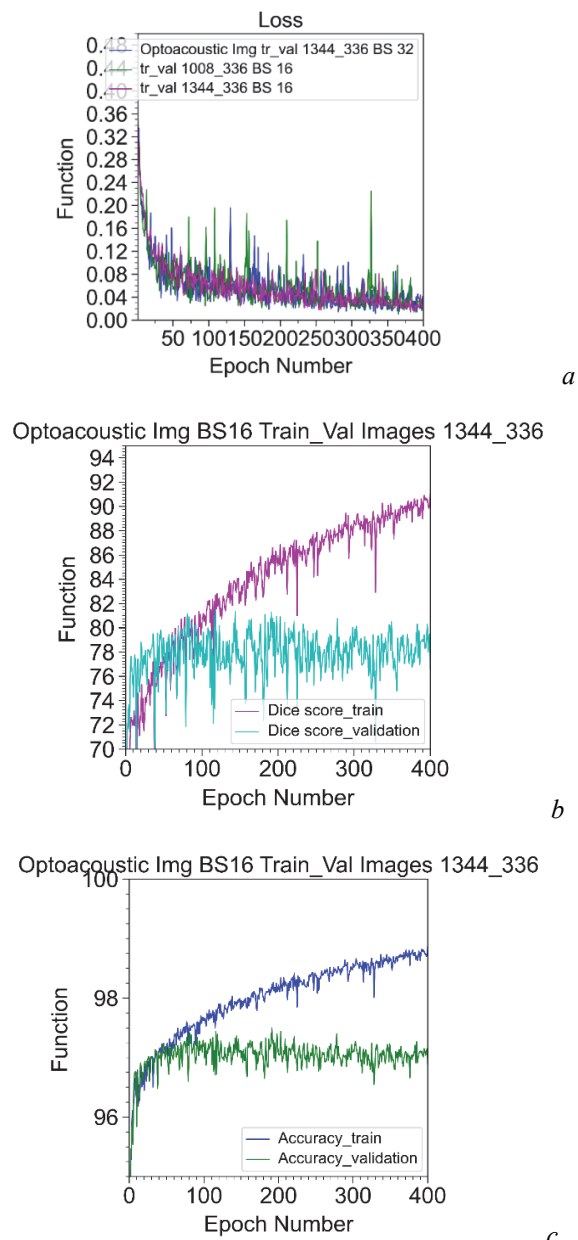
### Выводы

Лучшие данные для набора ОА-изображений (1344 в обучающей выборке, 336) в тестовой выборке для предсказания получены для размера батча 16 изображений. Достаточно 200 эпох для достижения удовлетворительного результата по

точности семантической классификации ОА-изображений около 98 % (97,84 %).

Пока не удастся достичь отделения изображения опухоли от фона с попиксельной точностью более 99 %. Пути решения: использовать больше преобразований исходного изображения с целью увеличения данных, кроме уже использованных (Rotate, HorizontalFlip, VerticalFlip); уменьшение размера батча.

Работа профинансирована Министерством науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания ИПФ РАН, проект № 0030-2021-0014.



**Рис. 6.** Графики Loss (Epoch Number), Dice (Epoch Number) и Accuracy (Epoch Number) для различных параметров модели U-net: *a* – зависимость функции потерь Loss от номера эпохи для наборов данных с разным количеством ОА-изображений и двух размеров батчей (32 и 16). Обучение и предсказания для тестового набора данных проводилось без предобучения; *b* – зависимость Dice (Epoch Number); *c* – Accuracy (Epoch Number), размер батча (BS) 16, модель без предобучения, MSE = 0,0934

## Литература

1. Beard P. Biomedical photoacoustic imaging. *Interface Focus*. 2011. V. 1(4). P. 602–631.
2. Kruger R.A., Lui P., Fang Y.R., et al. Photoacoustic ultrasound (pauS) – reconstruction tomography // *Med Phys*. 1995. V. 22(10). P. 1605–1609.
3. Wang L.V. Multiscale photoacoustic microscopy and computed tomography // *Nat. Photon*. 2009. V. 3(9). P. 503–509.
4. Haedicke K., Agemy L., Omar M., Berezhnoi A., Roberts S., Longo-Machado C., Skubal M., Nagar K., Hsu H.T., Kim K., Reiner T. High-resolution photoacoustic imaging of tissue responses to vascular-targeted therapies // *Nature Biomedical Engineering*. 2020. V. 4(3). P. 286–297.
5. Lan B., Liu W., Wang Y.C., Shi J., Li Y., Xu S., Sheng H., Zhou Q., Zou J., Hoffmann U., Yang W. High-speed widefield photoacoustic microscopy of small-animal hemodynamics // *Biomedical Optics Express*. 2018. V. 9(10). P. 4689–4701.
6. Hofmann U.A.T., Rebling J., Estrada H., Subochev P., Razansky D. Rapid functional photoacoustic microangiography in a burst mode // *Optics Letters*. 2020. V. 45(9). P. 2522–2525.
7. Orlova A., Sirotkina M., Smolina E., Elagin V., Kovalchuk A., Turchin I., Subochev P. Raster-scan photoacoustic angiography of blood vessel development in colon cancer models // *Photoacoustics*. 2019. V. 13. P. 25–32.
8. Xiang L., Xing D., Gu H., Yang D., Yang S., Zeng L., Chen W.R. Real-time photoacoustic monitoring of vascular damage during photodynamic therapy treatment of tumor // *Journal of Biomedical optics*. 2007. V. 12(1). Art. 014001.
9. Noble J.A., Boukerroui D. Ultrasound image segmentation: A survey // *IEEE Trans. Med. Imag*. 2006. V. 25(8). P. 987–1010.
10. Lutzweiler C., Meier R., Razansky D. Photoacoustic image segmentation based on signal domain analysis // *Photoacoustics*. 2015. V. 3(4). P. 151–158.
11. Mandal S., Dean-Ben X.L., Razansky D. Visual quality enhancement in photoacoustic tomography using active contour segmentation priors // *IEEE Trans. Med. Imag*. 2016. V. 35(10). P. 2209–2217.
12. Shi Z., He L., Suzuki K., Nakamura T., Itoh H. Survey on neural networks used for medical image processing // *Int. J. Comput. Sci*. 2009. V. 3(1). P. 86–100.
13. Bungart B.L. et al. Photoacoustic tomography of intact human prostates and vascular texture analysis identify prostate cancer biopsy targets // *Photoacoustics*. 2018. V. 11. P. 46–55.
14. Zhang J., Chen B., Zhou M., Lan H., Gao F. Photoacoustic image classification and segmentation of breast cancer: a feasibility study // *IEEE Access*. 2019. V. 7. P. 5457–5466.
15. Antholzer S., Haltmeier M., Schwab J. Deep learning for photoacoustic tomography from sparse data // *Inverse Probl. Sci. Eng*. 2018. V. 27. P. 987–1005.
16. Guan S., Khan A., Sikdar S., Chitnis P.V. Fully dense UNet for 2D sparse photoacoustic tomography artifact removal // *IEEE J. Biomed. Health Inform*. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2019.2912935>.
17. Hauptmann A. et al. Model-based learning for accelerated, limited-view 3-D photoacoustic tomography // *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2018. V. 37. P. 1382–1393.
18. Waibel D. et al. Reconstruction of initial pressure from limited view photoacoustic images using deep learning // *Proc. SPIE*. 2018. V. 10494. Art. 104942S.
19. Cai C., Deng K., Ma C., Luo J. End-to-end deep neural network for optical inversion in quantitative photoacoustic imaging // *Opt. Lett*. 2018. V. 43. P. 2752–2755.

20. Kirchner T., Gröhl J., Maier-Hein L. Context encoding enables machine learning-based quantitative photoacoustics // *J. Biomed. Opt.* 2018. V. 23. Art. 056008.
21. Reiter A., Bell M.A.L. A machine learning approach to identifying point source locations in photoacoustic data // *Proc. SPIE*. 2017. № 10064. Art. 100643J.
22. Allman D., Reiter A., Bell M.A.L. Photoacoustic source detection and reflection artifact removal enabled by deep learning // *IEEE Trans. Med. Imaging*. 2018. V. 37. P. 1464–1477.
23. Govinathallathyanarayana S., Ning B., Cao R., Hu S., Hossack J.A. Dictionary learning-based reverberation removal enables depth-resolved photoacoustic microscopy of cortical microvasculature in the mouse brain // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 985.
24. Gutta S. et al. Deep neural network-based bandwidth enhancement of photoacoustic data // *J. Biomed. Opt.* 2017. V. 22. Art. 116001.
25. Hauptmann A. et al. Model-based learning for accelerated, limited-view 3-D photoacoustic tomography // *IEEE Trans. Med. Imaging* 2018. V. 37. P. 1382–1393.
26. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // *Proc. 18th Int. Conf. Med. Image Comput. Comput.-Assist. Intervent.* 2015. V. 9351. P. 234–241.
27. Dice L.R. Measures of the amount of ecologic association between species // *Ecology*. Jul. 1945. V. 26(3). P. 297–302.
28. Subochev P. Cost-Effective Imaging of Optoacoustic Pressure, Ultrasonic Scattering, and Optical Diffuse Reflectance with Improved Resolution and Speed // *Opt. Lett.* 2016. V. 41(5). P. 1006–1009.
29. Subochev P.V., Prudnikov M., Vorobyev V., Postnikova A.S., Sergeev E., Perekatova V.V., Orlova A.G., Kotomina V., Turchin I.V. Wideband Linear Detector Arrays for Optoacoustic Imaging Based on Polyvinylidene Difluoride Films // *J. Biomed. Opt.* 2018. V. 23(9). Art. 91408.
30. Orlova A., Sirotkina M., Smolina E., Elagin V., Kovalchuk A., Turchin I., Subochev P. Raster-Scan Optoacoustic Angiography of Blood Vessel Development in Colon Cancer Models // *Photoacoustics*. 2019. V. 13. P. 25–32.
31. <https://arxiv.org/abs/1505.04597>.
32. [https://github.com/aladdinpersson/Machine-Learning-Collection/tree/master/ML/Pytorch/image\\_segmentation/semantic\\_segmentation\\_unet](https://github.com/aladdinpersson/Machine-Learning-Collection/tree/master/ML/Pytorch/image_segmentation/semantic_segmentation_unet).

# Формирование образов электрического поля и попытка преодолеть внутривидовой барьер

В.М. Ольшанский<sup>1</sup>, Д.В. Зленко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИПЭЭ РАН, г. Москва; email: vmolsh@yandex.ru

<sup>2</sup>Биологический факультет МГУ, г. Москва; email: dvzlenko@gmail.com

## Введение

В презентациях «Становление электродинамики как модельный эволюционный эксперимент», представленных на конференциях 2017 и 2019 гг., было дано определение электродинамики как разновидности когнитивной деятельности, специализирующейся на формировании у особей вида *Homo sapiens* представлений об электромагнитных явлениях и возможности их использования в интересах особей *Homo sapiens*. Так, например, основной задачей, которую ставил себе Максвелл при написании трактата об электричестве и магнетизме, было выразить все электромагнитные явления «на языке представлений, заимствованных в основном у Фарадея» [1. С. 13]. При этом «Фарадей своим мысленным взором видел пронизывающие все пространство силовые линии там, где математики видели центры сил, притягивающие на расстоянии. Фарадей видел среду там, где они не видели ничего, кроме расстояния» [1. С. 13]. Очевидно, что такие представления, такие мысленные образы опираются на человеческую культуру. Мысленные образы Фарадея и Максвелла вошли в общечеловеческую культуру. Но можно ли выйти за ее пределы? Можно ли поделиться этими образами с представителями других видов? Можем ли мы научиться мысленным образам электрических явлений, которые формируются в головах представителей других видов? Существуют животные, способные воспринимать пространственное распределение и динамику электрических полей с помощью системы специализированных электрорецепторов. Богаче всего такие системы развиты у представителей двух отрядов пресноводных рыб – кловорылообразных (мормирид), обитающих в Африке, и гимнотообразных, обитающих в Южной Америке. Можем ли мы научиться опыту их восприятия? Эти вопросы становятся все более актуальными по мере развития технологии многоэлектродной матричной регистрации картин электрических полей [2, 3], разрабатываемой главным образом для биологических исследований. Есть много оснований полагать, что электрические явления играют большую роль в жизни различных животных, особенно водных. Однако наши знания в этой области, получившей в 1970-е годы название «электроэкология» [4], остаются крайне скудными, что в первую очередь связано с отсутствием адекватных научных инструментов. Очевидно, что наиболее эффективными были бы приборы, имитирующие системы активной и пассивной электрорецепции мормирид и гимнотид. Принципы построения аппаратной час-

ти таких приборов более или менее понятны. Однако более сложная часть проблемы – программная и концептуальная. Какие образы мы хотим получить на выходе искусственных систем электровидения? Насколько эффективным окажется здесь бионический подход и заимствование идей из результатов исследований электрических рыб?

## Два базовых типа изображений, иллюстрирующих пространственное распределение и динамику электрических токов

Поиск в сети по ключевым словам «картинки электрических полей» дает ссылки на довольно примитивные изображения поля 2 точечных зарядов или поля внутри конденсатора. Одно из первых (если не первое) изображений линий тока в проводящей среде принадлежало Генри Кавендишу и содержалось в публикации 1775 г. «Отчет о попытках имитации воздействия Torpedo с помощью электричества» [5]. Были схематически показаны электрические токи, протекающие в воде во время разряда электрического скака. Изображение иллюстрировало ответ Кавендиша на вопрос: почему ток от электрического скака протекает по телу человека, если ему гораздо проще и короче течь по морской воде? Ответ состоял в том, что в отличие от наблюдаемых искр в воздухе в проводящей среде ток течет по всем доступным путям. Через 70 лет, в 1845 г., похожие и сходным образом иллюстрированные идеи опубликовал Густав Кирхгоф в работе «О прохождении электрического тока через плоскую пластину, например круглой формы» [6]. Именно в этой работе были сформулированы правила Кирхгофа, наполнившие физическим смыслом закон Ома и сделавшие его основным инструментом электротехнических расчетов. Первая работа Максвелла по электричеству называлась «О Фарадеевых силовых линиях» [7] и содержала подробнейшее изложение принципов построения такого рода картин с учетом количественных особенностей пространственного распределения токов. Позже в трактате [1] Максвелл привел множество построенных им распределений полей для случаев существенно более сложных, чем поле двух точечных источников. В советской литературе по электродинамике излагалась методика построения изображений электрических полей и токов [8], но широкого распространения использование таких графических подходов для решения практических задач не получило.

Второй базовый тип визуальных образов отображает не пространственное распределение, а



временную динамику электрических явлений. Это осциллограммы. Получение первых осциллограмм с помощью вращающихся барабанов с законченным стеклом требовало высокого мастерства механиков. Например, Карло Маттеуччи [9] в своих исследованиях животного электричества использовал прибор для измерения динамики мышечных сокращений, сделанный одним из представителей династии великих часовщиков Луи Франсуа Клементом Бреге (1804–1883). Оценка динамики физиологических, в том числе электрофизиологических, процессов воспринималась в XIX веке как задача достойная серьезных усилий. Практика регистрации и анализа осциллограмм на протяжении становления электродинамики стремительно расширялась и сейчас чрезвычайно многообразна. Однако осциллограммы и картинки распределения полей очень мало связаны друг с другом. Даже если в одном и том же эксперименте с помощью многоэлектродной регистрации исследователи пытаются локализовать источник поля, осциллограммы приводятся отдельно, картинка пространственного распределения – отдельно.

#### **Генерация и восприятие электрических полей слабоэлектрическими рыбами**

Если в поисковом запросе к «картинкам электрического поля» добавить слово «рыб», то картинки становятся заметно богаче и интереснее. В частности, добавляются картинки, иллюстрирующие принцип активной электролокации. Первым этот принцип сформулировал и проиллюстрировал Ганс Вернер Лиссманн [10]: в однородной водной среде рыба создает электрическое поле, напоминающее поле диполя, а предмет, имеющий электропроводность отличную от электропроводности воды, искажает силовые линии и нарушает первоначальную конфигурацию поля. Эти изменения картины поля могут быть восприняты рыбой и использованы для локации объектов. В предыдущих презентациях становления электродинамики отмечалось, что исследования электрических рыб приводили к кардинальным изменениям физических представлений и их технических следствий. Это относится и к экспериментам и публикациям Гальвани и Вольты, и к истории создания volta столба. Публикация Лиссманна 1958 г. не была новым словом в физике или технике. Она опирается на ставшие традиционными физические идеи и существующие технические устройства. Ее революционность касается биологии: открытие электрорецепции и способности рыб к электролокации и коммуникации. Один из важных когнитивных вопросов, положительный ответ на который дал Лиссманн, состоял в том, что мы можем принципиально понять, каким образом воспринимает мир представитель другого вида, обладающий чувством, отсутствующим у нас. С помощью условно-рефлекторных экспериментов Лиссманн выяснял, что могут и что хотят тестируемые особи, и сопоставлял их реакции со своими мыслен-

ными представлениями и физико-математическими моделями о возможностях локации объектов по искажениям картин распределения электрических токов.

#### **Электровидение у электрических рыб**

Более поздние физиологические исследования Томаса Сабо, Теодора Буллока и Вальтера Хейлигенберга существенно добавили конкретики общим построениям Лиссманна [11]. Стало гораздо понятнее не только зачем рыбы генерируют и воспринимают электрические токи, но и как конкретно они это делают. В частности, как они различают форму и частоту разрядов другой особи. Есть ли в голове рыбы условный осциллограф или спектроанализатор и если да, то как он устроен и кто в него смотрит?

Мормириды и гимнотиды демонстрируют чрезвычайно разнообразные и вместе с тем стабильные электрические разряды. Разные виды этих рыб генерируют разряды разной формы. У некоторых рыб разряды самок и самок заметно отличаются друг от друга. Поведенческие эксперименты показывают, что рыбы способны различать эти разряды, но как они это делают? Очень заметными и успешными были исследования Вальтера Хейлигенберга так называемой реакции избегания помех (Jamming Avoidance Response – JAR). Хейлигенберг работал на рыбах рода *Eigenmannia*, генерирующих непрерывные периодические разряды. Когда к одной особи с частотой F1 подплывает другая рыба с близкой частотой F2, то обе рыбы сдвигают свои частоты, увеличивая разность частот [12]. Это безусловная реакция. Если другую рыбу заменить искусственным стимулом, который всегда будет не увеличивать, а уменьшать разность частот, то наблюдается постоянное изменение частоты с периодическим перескоком. То есть если стимул ниже частоты рыбы и рыба увеличивает частоту, чтобы уйти от помехи, то при достижении какого-то верхнего предела она скачком меняет частоту на заметно более низкую, чем у стимула. Поскольку стимулятор тоже меняет частоту вслед за рыбой, то снова наблюдается плавное повышение частоты до следующего скачка вниз. Чувствительность рыб к разности собственной и чужой частоты соответствует микросекундным различиям по фазовым сдвигам. По ходу своих нейрофизиологических исследований Хейлигенберг проследил трансформацию ответов от электрорецепторов в разных слоях мозга и показал, как принимается в мозге рыб решение об изменении частоты. Согласно Хейлигенбергу рыба строит образы в амплитудно-фазовой плоскости. При этом пространством, относительно которого строятся образы, выступает проекция собственного поля рыбы на ее электрорецепторную систему. Эксперименты показывают, что в присутствии собственного поля чувствительность электрорецепторов повышается в десятки раз. Это вызывает сомнения, а правильно ли назван сам эффект? Служит ли JAR для того, что-

бы уйти от помехи, или для того, чтобы лучше распознать чужой сигнал? Аналогичная ситуация складывается и с так называемыми пульсирующими рыбами, генерирующими стабильные короткие импульсы с нерегулярными интервалами между ними. У большинства этих рыб наблюдается «эхо-ответ», то есть при помещении двух рыб рядом друг с другом одна рыба генерирует свой разряд через короткий (например, 12 мс) интервал после первой. Считается, что это защитный механизм и не мешали локационной функции. Однако эксперименты Westby [13] показали, что когда двух незнакомых рыб помещают вместе, то рыбы, напротив, пытаются добиться, чтобы их разряды перекрывались по времени, и лишь потом переходят к эхо-ответу. Более того, в экспериментах с искусственными стимулами рыбы отличают особенности разрядов и условную «голову» диполя, имитирующего другую рыбу, только в том случае, когда ее разряды перекрываются с разрядами дипольного источника. Если же аппаратура построена так, что не позволяет добиться перекрывания, то и различения формы и полярности импульсов не происходит. Речь здесь вновь идет о микросекундных отличиях. Westby предположил, что имеет место стробоскопический эффект. Однако его собственные экспериментальные данные противоречат этой идее. Гораздо убедительнее выглядит, что и в этом случае имеет место модель Хейлигенберга – образ чужой рыбы строится в амплитудно-фазовой плоскости относительно собственного поля. При этом в отличие от двух базовых образов в электродинамике – картинок в декартовом пространстве и осциллограмм – образы в амплитудно-фазовой плоскости отображают и временную динамику, и пространственное распределение внешних сигналов.

#### **Многоэлектродная матричная регистрация как модель электрорецепторной системы**

В пионерской публикации Лиссманна [10] предполагалось, что электрорецепторов много, что они распределены по всему телу рыбы и образуют некую «электрическую сетчатку» аналогичную глазу. Это предположение позже полностью подтвердилось, число электрорецепторов на рыбе может достигать десятков тысяч. Рецепторы бывают нескольких физиологических типов, что позволяет различать также и «цвет» – то есть разное соотношение резистивных и емкостных свойств лоцируемых объектов. Очевидно, что модель электрорецепторной системы на базе большого количества электродов и, соответственно, каналов оцифровки была бы наиболее адекватна целям исследования роли электрических полей в жизни водных животных. Однако до настоящего времени подавляющее большинство исследований слабоэлектрических рыб выполнено с помощью одной-двух пар больших электродов, закрепленных на стенках аквариума. Это все равно, что изучать возможности и роль зрения с помощью фототур-

никетов метрополитена. Такая ситуация связана, конечно, с заметной технической сложностью задачи. Между тем в смежных областях начинают появляться примеры создания и применения многоэлектродных и многоканальных комплексов для исследования биоэлектрических полей. Так, группа японских специалистов разрабатывает системы для мониторинга поведения личинок *Danio rerio* по их электрическим полям [14]. *Danio rerio* за последние годы стала очень распространенным лабораторным животным для разного рода исследований, включая токсикологические. Поэтому системы неинвазивного контроля за их поведением могут быть широко востребованы, что оправдывает усилия, вкладываемые в разработку сложных аппаратно-программных комплексов. Эти рыбы не обладают ни специализированной электрогенерацией, ни электрорецепцией. Разработчики используют для контроля их низкочастотные электрические поля, возникающие при дыхательных движениях, а также их электрокардиограммы. Первоначально система включала решетку из 126 Ag/AgCl электродов, в последующих разработках число электродов увеличивалось. Аналогичные задачи неинвазивного контроля личинок *Dania rerio* решались специалистами из США [2, 15], но в качестве электродной решетки использовались элементы печатной платы. Основой разработок послужил опыт в области электроэнцефалографии. В самые последние годы при создании многоэлектродных регистрирующих матриц наблюдается переход от технологии на основе печатных плат к нанотехнологиям, используемым при изготовлении микросхем [2, 3, 16]. При этом число электродов решетки увеличилось до тысяч, что сопоставимо с числом электрорецепторов рыб. Одновременно расширяется круг задач и исследуемых объектов. С уменьшением шага решетки становится доступным исследование динамики клеточных культур. Однако разработки многоэлектродных технологий этого плана и построение конечных образов почти не пересекаются с исследованиями электрических рыб и не опираются на опыт исследований электрорецепции.

В исследованиях слабоэлектрических рыб есть своя традиция визуализации их электрических полей [17] и своя ориентация на бионику [18]. Однако речь идет исключительно о гипнотидах и мормиридах с их регулярными разрядами стабильной формы, позволяющими активно использовать накопление при регистрации на небольшое (например, 8) количество электродов. Общая картина строится на основе синтеза множества разрядов.

Между тем с точки зрения проблемы восстановления эволюционной истории электрических рыб и с точки зрения общей электроэкологии большой интерес представляют рыбы с редкими эпизодическими разрядами, такие как скаты, звездочеты, сомы, полиптерусы и протоптерусы [19]. Аппаратура и методика должны позволять отдельно проанализировать каждое электрическое событие и локализовать его источник.



При наших разработках многоэлектродных систем визуализации электрических полей мы исходим из такой постановки задачи. Наша система реализована на относительно небольшом ( $8 \times 8 = 64$ ) количестве электродов, размещенных с шагом 6 см на дне аквариума. Эксперименты с такой и даже меньшей ( $6 \times 4$ ) матрицей позволяют увидеть множество ранее не доступных деталей поведения, например какая из двух активно взаимодействующих рыб является источником данного разряда или в какой части тела находится источник тока и насколько он протяженный.

Существует еще один момент, на который хочется обратить внимание в связи с проблемой заимствования опыта чужого восприятия мира. Электрорецепторная система рыб – это особое, совершенно отдельное сенсорное чувство со своими рецепторами и своими структурами в мозге. Это не зрение и не слух. Можем ли мы перенять чужой опыт восприятия, если мы не имеем от природы ни рецепторов данного типа, ни природного опыта обработки? В этой связи представляется крайне интересным многолетний эксперимент, который поставил над собой Нил Харбиссон – человек, которого называют «художник-киборг» [20]. У Нила редкий природный дефект – отсутствуют колбочки, обеспечивающие восприятие цвета. С рождения он видел мир черно-белым. Однако он закрепил себе на голове систему из фотодатчика и преобразователя «цвет – звук», которую не снимает с начала 2000-х. Эта система позволила ему слышать цвет и видеть звук. Более того, система позволяет воспринимать цвета в широком диапазоне, включающем часть ИК- и УФ-диапазонов. Нил воспринимает цвета и может рисовать красками. Преобразователь вживлен в его голову и стал частью его расширенного фенотипа. Опыт Нила показывает, что отсутствие природных структур, предназначенных для восприятия тех или иных стимулов, не является преградой для построения сенсорных систем, причем совсем другой сенсорной модальности.

### Литература

1. Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме. Т. 1. М.: Наука, 1989.
2. Hong S., Lee P., Varaban S.C., Lee L.P. A Novel Long-term, Multi-Channel and Non-invasive Electrophysiology Platform for Zebrafish // *Sci Rep.* 2016. V. 6(1). P. 28248.
3. Miccoli B. et al. High-Density Electrical Recording and Impedance Imaging With a Multi-Modal CMOS

Multi-Electrode Array Chip Front // *Neurosci.* 2019. URL: <https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00641>.

4. Протасов В.Р., Бондарчук А.И., Ольшанский В.М. Введение в электроэкологию. М.: Наука, 1982. 336 с.
5. Cavendish H. An account of some attempts to imitate the effects of the Torpedo by electricity // *Philos. Trans. Roy. Soc.* 1776. V. 66. P. 196–225.
6. Кирхгоф Г. О прохождении электрического тока через плоскую пластину, например, круглой формы // Избр. труды / Г. Кирхгоф. М.: Наука, 1948. С. 155–165.
7. Максвелл Дж.К. О Фарадеевых силовых линиях // Избранные сочинения по теории электромагнитного поля / Дж.К. Максвелл. М.: Гостехиздат, 1952.
8. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. М.: Энергия, 1968.
9. Matteucci C. Electro-Physiological Researches. Fourth Memoir. The Physiological Action of the Electric Current // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 1846. V. 136. P. 483–499.
10. Lissmann H.W. On the function and evolution of electric organs in fish // *J. Exp. Biol.* 1958. V. 35. P. 156–191.
11. *Electroreception* / Ed. T.H. Bullock, W. Heiligenberg. N.Y.: Wiley, 1986. 722 p.
12. Heiligenberg W. *Neural Nets in Electric Fish.* Cambridge: MIT Press, 1991. 179 p.
13. Westby G.W.M. Electric communication in fish and the problem of recognizing very brief waveforms // *J. Biol. Educ.* 1987. V. 21, № 3. P. 190–196.
14. Soh Z., Matsuno M., Yoshida M., Tsuji T. Real-Time Cameraless Measurement System Based on Bioelectrical Ventilatory Signals to Evaluate Fear and Anxiety // *Zebrafish.* 2018. V. 15, № 2. P. 133–144; doi: 10.1089/zeb.2017.1491.
15. Tomasello D.L., Sive H. Noninvasive Multielectrode Array for Brain and Spinal Cord Local Field Potential Recordings from Live Zebrafish Larvae // *Zebrafish.* 2020. V. 17, № 4. P. 271–277.
16. Kim R., Joo S., Jung H., Hong N., Nam Y. Recent Trends in Microelectrode Array Technology for In Vitro Neural Interface Platform // *Biomed. Eng. Lett.* 2014. V. 4. P. 129–141; doi: 10.1007/s13534-014-0130-6.
17. Rasnow B. Measuring and visualizing EOD fields // *Communication in fishes* / F. Ladich, S.P. Collin, P. Moller and B.G. Kapoor (eds.). Enfield: Science Publishers, 2006. P. 599–622.
18. Caputi A.A., Aguilera P.A. Strategies of object polarization and their role in electrosensory information gathering // *Bioinspir. Biomim.* 2020. V. 15(3). P. 035008; doi: 10.1088/1748-3190.
19. Olshanskiy V.M., Kasumyan A.O., Moller P. On mating and function of associated electric pulses in *Clarias macrocephalus* (Günther 1864): probing an old puzzle, first posed by Charles Darwin // *Environmental Biol. of Fishes.* 2020. V. 103. P. 99–114; doi:10.1007/s10641-019-00936-w.
20. <https://esquire.ru/articles/5869-neil-harbisson/>.

# Осознание природы когнитивных моделей постнеклассической научной рациональности – первое условие овладения ноосферным мышлением

С.В. Палагин

г. Саратов, email: palaginsv2007@yandex.ru

Научившись быть активным в своей рефлексии и сделав философскую логико-поведенческую когнитивную культуру частью своей пусть виртуальной, но тем не менее жизненной реальности, наш предок открыл для себя возможность пользоваться когнитивными моделями. Например, такая когнитивная модель, как **мысленный эксперимент**, быстро получила признание в Античном мире не только среди философов – её взяли на вооружение и учёные. С тех пор с нею мыслители не только более эффективно решали прикладные задачи, но и расширяли своё понимание Логики Бытия во всех теоретических дисциплинах – от философии и этики до квантовой механики. Среди самых известных мысленных экспериментов мы знаем такие, как «Ахиллес и черепаха», «кот Шрёдингера», «проблема вагонетки», и другие. Выстраивая мысленный эксперимент в своём воображении, интеллектуалы избегали ошибок, оценивали возможные последствия своих действий и выбирали лучшее решение. Работала формула: сначала прогностическая когнитивная самоорганизация, потом поведенческая самореализация.

С наступлением XX века мы поняли, что наука под названием «когнитология», по сути, начинается с того момента, когда мы обретаем научное понимание когнитивного моделирования. Когда мы открываем для себя, что такое «универсальный мыслительный код» (УМК), что такое «концепт» как простейшая модель отражённой реальности в набравшей новых возможностей нейрофизиологической организованности субъекта. Начав доказательно размышлять над природой концепта, над его доказательным обоснованием и последующим применением в осознаваемой рефлексии, интеллектуалы открыли в себе такого интроспективного теоретика, как **«когнитолог»**. Вынеся обсуждение темы концепта в культурное и научное пространство своих соотечественников, они превратили интроспективного теоретика в новую социальную роль научного сообщества. Есть основания считать одной из эпохальных когнитологических работ начала XX в. работу Дж. Дьюи «Как мы мыслим» (1915) и его самого – одним из первых когнитологов.

Но это были ещё цветочки...

Начало XX в. было ознаменовало ещё и тем, что учёные открывали и осваивали новую научную парадигму – неклассическую научную рациональность. Достижения таких учёных, как А. Эйнштейн, М. Планк, В. Гейзенберг, А. Майкельсон, и других заставили засомневаться в неизменности классических когнитивных моделей и привычного

для XIX в. образа мышления. Для кого-то эти десятилетия стали эпохой научного крушения, а для кого-то – научного взлёта.

Сегодня, в начале XXI в., научное сообщество уже повсюду живёт когнитивными моделями не только в третьей научной парадигме – постнеклассической; применение всевозможных когнитивных моделей стало нормой в любой профессиональной области. Такие понятия, как «когнитивная карта», «иерархия когнитивных карт», «динамические когнитивные карты» и подобные им, уже есть в нашем научном и технологическом лексиконе [1]. Другое дело, что многие продолжают пользоваться когнитивным моделированием на уровне узнаваемой и познаваемой рефлексии, но это не отменяет самой его природы, и формула «сначала прогностическая когнитивная самоорганизация – потом поведенческая самореализация» как работала, так и продолжает работать.

Мы знаем, что сегодня проблема междисциплинарных отношений в развитии фундаментально-научного знания настолько важна и актуальна, что её осознают не только учёные, но и передовые политики. Так, в подписанном 3 июля сего года Указе Президента РФ «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» в разделе «Научно-техническое развитие» на 30-й странице специально обращено внимание на развитие междисциплинарных отношений [2].

Это и очевидно, ибо с разрешением проблем междисциплинарных отношений мы приходим к цельному научному мировоззрению, а от него уже один шаг к единой научной государственной идеологии, о необходимости которой для такого многонационального и многоконфессионального государства, как Россия, уже трубят все, кто сознаёт эту острейшую проблему. Никакая идеология не существует без своего мировоззренческого фундамента, а научная особенно. Мир един, и необходимость его единого мировоззренческого охвата лучшие умы обсуждают и решают уже третье столетие – с начала существования фундаментально-научного, всё ещё полидисциплинарно созревающего знания.

Однако до появления постнеклассической научной рациональности, которая заявила о себе с середины прошлого века достижениями таких выдающихся учёных, как И.Р. Пригожин, Г. Хакен, С.П. Курдюмов, В.С. Стёпин и других, проблема единства фундаментально-научного была неразрешима.

Почему? Сегодня ответ таков: только в этой, уже третьей, научной парадигме мы наконец-то

увидели материальный мир, частью которого являемся, не только существующим и движущимся, но и ещё и самоорганизующимся. Да, мы отдаём должное первопроходцам нелинейной динамики, синергетики и исследователям диссипативных структур, но надо отметить и значительность вклада в эту парадигму В.С. Стёпина, предложившего и обосновавшего концепцию универсального эволюционизма [3]. Мало знать, что в мире существуют самоорганизующиеся системы самой разной природы, надо научиться видеть весь мир, всю Вселенную эволюционирующей или самоорганизующейся. И это онтологическое положение, как важнейшее, мы добавили сегодня в нашу научную копилку.

Далее всё логично: мы рассматриваем эволюцию Жизни продолжительностью 4,5 миллиарда лет как часть эволюции Вселенной продолжительностью 13 миллиардов лет.

Во всей этой эволюции есть транссамоорганизационные переходы, в которых материя эволюционирует от одной формы самоорганизованности к другой, более сложной и более высокой.

Что нам необходимо для того, чтобы это понять? Иметь мозг, способный оперировать не только когнитивными моделями самоорганизующихся систем разной природы, но и когнитивными моделями транссамоорганизационных переходов. Это аксиоматично: для того чтобы мы могли над чем-то размышлять, у нас должна быть соответствующая когнитивная модель.

Так же аксиоматично и следующее: для осмысления и понимания нами новых и сложных явлений когнитивные модели в нашем сознании сами не появляются – мы их вырабатываем как в директных, так и в методологических, рефлексивных исследованиях и экспериментах. И здесь, как это кому-то ни покажется странным и тавтологичным, мы должны поставить свои методологические разработки под методологический контроль. Но для человека с развитой рефлексией чего же странного? Мы же осознанно рефлекслируем свою рефлексию со времён Джона Локка и вполне здраво рассуждаем о том, что нас в нашей рефлексии устраивает, а что – нет [4].

Прежде чем мы смогли подойти к проблеме сопряжения когнитивных моделей самоорганизованных и самоорганизующихся систем, нам сначала эти модели надо было просто иметь и научиться ими работать (= мыслить). Нам нужно было подняться на новый концептуальный уровень и выработать понимание того, что такое «модель самоорганизующейся системы вообще», далее на её основе выстроить адекватную Логике Бытия классификацию таких моделей и только после этого задумываться о разработке на порядок более сложных – транссамоорганизационных моделей.

Здесь я себе позволю заметить, что термин «нелинейная» применительно к динамике является неудачно выбранным (из-за незрелости методологии того времени, когда он был введён в оборот) и нуждается в переосмыслении.

Как мы его ввели в наш научный лексикон? Как альтернативное классическому понятию «линейная динамика». Или как альтернативное тем когнитивным моделям линейного движения, которыми мы мыслили до сих пор. Мыслили (и продолжаем мыслить) в классической научной парадигме. Даже в неклассической научной рациональности у нас ещё доминирует «линейность» мышления.

Нелинейная динамика – это, по сути, нелинейное движение. (Посмотри, Читатель, этимологию слова «динамика» в Интернете.) Но движение не может быть нелинейным. Движение любого материального тела всегда идёт по какой-то траектории, а значит, по линии. Другое дело, когда мы в мышлении поднимаемся над отдельным материальным телом и рассматриваем динамику целой материальной системы. И тогда в понятие «динамика» мы вкладываем другой, более глубокий смысл.

Употребление приставки «не» в данном случае было скоропалительным, поверхностным и, следовательно, с сегодняшней точки зрения неадекватным. Если мы от привычного классического, механистического монолинейного движения переходим к более сложному, то разумнее употребить понятие «полилинейное» движение. Мы новым понятием должны отражать суть нового познаваемого явления, а не противопоставлять его устаревшему образцу, от которого ушли в своём познании. Называть новое явление термином, образованным от старого с приставкой «не», – это всё равно, что просить в железнодорожной кассе билет «из Москвы». В конце концов, мы сегодня знаем, что нелинейных динамик много. И что, мы их все «под одну гребёнку» будем называть единым и явно неадекватным термином? Пришло время избавиться от этой терминологической незрелости.

Сколько у нас на сегодня разных «нелинейных» динамик, которые мы знаем как бы «по факту» и как бы уже отличаем друг от друга?

- полилинейная динамика,
- политраекторная динамика,
- надлинейная динамика,
- подлинейная динамика,
- турбулентная динамика,
- фрактальная динамика,
- полипараметральная динамика,
- обратносвязевая (кибернетическая) динамика,
- самоорганизационная динамика и
- транссамоорганизационная динамика...

Ещё?

Со всеми этими динамиками мы уже имеем дело в постнеклассической научной рациональности, и почему бы не назвать следующую конференцию «Постнеклассическая динамика в когнитивных исследованиях»? Или «Синергетическая динамика в когнитивных исследованиях»? Традиции традициями, но надо, что называется, «мыслить по сути и по существу»!

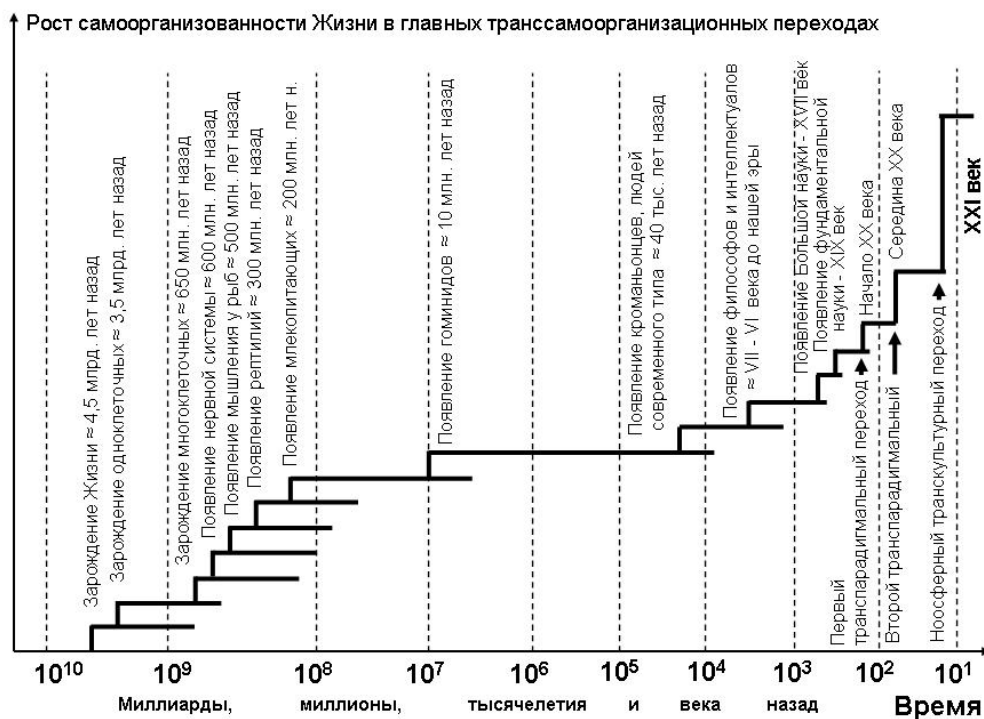
Когнитивная модель транссамоорганизационной динамики сегодня затребована логикой научного развития, и без неё мы будем просто топтаться на месте.

В своей монографии «Ноосферное мышление, или Что такое нофукома в интеллектуальной самоорганизованности ноосферянина» (2021) я, автор, в рамках осознанной рефлексии предложил концепцию транссамоорганизационного концепта, которым мы можем отражать и моделировать транссамоорганизационные переходы в эволюции Вселенной и земной Жизни как её части [5]. От зарождения Жизни до появления ноосферного мышления. Появление ноосферного мышления – это самый последний, уже идущий сегодня транссамоорганизационный, транскультурный и транспарадигмальный переход, который нам судьба делать самим как интеллектуально активным субъектам планетарно-космического явления – Земной Жизни. Мы должны сознавать, какими

когнитивными моделями мы мыслим, ибо только через это мы приходим к ноосферному мышлению.

В упомянутой мною монографии рассмотрены важнейшие транссамоорганизационные переходы, которыми эволюционировала Жизнь от своего зарождения до ноосферного транскультурного перехода (см. рисунок).

Только раскрыв природу всех предыдущих транссамоорганизационных переходов, только осмыслив их соответствующими когнитивными моделями, мы логично подойдём к самому последнему и самому актуальному для нас сегодня – ноосферному – и сможем выступить в нём не пассивными наблюдателями, а активными созидателями. Разработав при этом в виртуальном моделировании соответствующую прогностическую глобальную научную когнитивную модель, утверждённую с позиции осознанной научной рефлексии.



### Литература

1. 9 когнитивных моделей, которые позволят решить любую проблему. URL: /https://lifehacker.ru/kognitivnyye-modeli/.
2. Указ Президента Российской Федерации «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» № 400 от 2 июля 2021 года.
3. Стёпин В.С. Теоретическое знание. М.: Прогресс-Традиция, 2003.

4. Палагин С.В. Рефлексивное мышление: закономерности становления и структурные уровни: дис. ... канд. филос. наук. 1992. 132 с.
5. Палагин С.В. Ноосферное мышление, или Что такое нофукома в интеллектуальной самоорганизованности ноосферянина: Метод. пособие (самоучитель) по интеллектуальной самоорганизации. М.: Радуга, 2021. 352 с.

# Стробирующие моменты жизни с точки зрения учёного-вероятностника.

*К 80-летию М.А. Федоткина*

Н.Г. Панкрашкина<sup>1</sup>, Е.В. Пройдакова<sup>1</sup>, В.Е. Хроматов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Московский энергетический институт, г. Москва  
png2@rambler.ru, ekaterina.projdakova@itmm.unn.ru, KhromatovVY@mpei.ru

Михаил Андреевич Федоткин – российский математик, основатель научной школы по прикладной теории вероятностей (ПТВ), случайных процессов и статистики; д.ф.-м.н., профессор, замечательный организатор науки и высшего образования, бессменный заведующий первой в стране кафедрой ПТВ ННГУ, созданной в 1986 г. для промышленности и конструкторских бюро Горьковского региона.

М.А. Федоткин в течение 60-летней научной и педагогической деятельности рассмотрел значительное число нетрадиционных задач из разных разделов прикладной теории вероятностей, математической статистики, теории случайных процессов и теоретической кибернетики.

Учёный убежден в том, что механизм возникновения большого числа природных явлений в значительной степени является стохастическим или вероятностным, хотя основная часть представлений о мире традиционно носит причинный характер.

## 1. Биографические сведения

Михаил Андреевич Федоткин родился накануне Великой Отечественной войны – 1 мая 1941 г. в глухой деревне Киселёвка Липецкой области. Он был младшим в числе семерых детей любящих и трудолюбивых русских людей; впоследствии он получил блестящее образование.

В разные годы Михаил Андреевич являлся учредителем и выборщиком РАЕН по секции «Математика, информатика, кибернетика» (1991), Соросовским профессором (2000, 2001), научным руководителем госбюджетной тематики ННГУ по проблеме «Теория вероятностей и математическая статистика».

В 1969 г. он защитил в Горьковском (ныне Нижегородском) университете им. Н.И. Лобачевского кандидатскую диссертацию по специальности «Теоретическая кибернетика», а в 1984 г. – докторскую по специальности «Теория вероятностей и математическая статистика» в Московском госуниверситете им. М.В. Ломоносова.

В 2011 г., то есть к своему 70-летию, Михаил Андреевич написал автобиографическую книгу «Траектории судьбы», в которой виден масштаб человека, возвратившего Богу долг своего рождения [1]. Стробирующими моментами для него являются: момент его зачатия и само рождение, первый урок в начальной школе, четыре момента смертельных испытаний, переезд из деревни

Киселёвка, где он появился на свет, в село городского типа Куркино, где закончил среднюю школу; затем – поступление в Горьковский государственный университет; моменты первой женитьбы и рождения сына, дочери, внуков и правнука; поступление в аспирантуру к Ю.И. Неймарку; первое знакомство с учёными, повлиявшими на научную карьеру, а также момент первого участия в семинарах основоположников теории вероятностей и математической статистики А.Н. Колмогорова и Б.В. Гнеденко в МГУ им. М.В. Ломоносова; защиты диссертаций, открытие лаборатории и кафедры, момент второй женитьбы на ученице и её безвременная смерть; расставания с близкими, моменты одиночества... Такова концепция математической модели любого живого существа.

## 2. Круг научных интересов

М.А. Федоткин – классический математик по образованию. Следуя опыту Горьковской научной школы по динамическим системам, основанной Ю.И. Неймарком [2], в начале своей научной карьеры Михаил Андреевич использовал детерминированный подход при построении моделей реальных процессов и явлений.

Начиная с 1967 г. под впечатлением научных семинаров в МГУ стал придерживаться статистического мировоззрения при построении и исследовании математических моделей реальных экспериментов.

## 3. Научные подходы

В свое время научные подходы М.А. Федоткина с использованием им статистических методов бурно обсуждались в научном сообществе: из-за нового взгляда на науку и распознавания в теории вероятностей, из-за выдвинутых им нетрадиционных математических моделей.

На прениях по защите докторской диссертации математик академик РАН Ю.В. Прохоров заявил: «...М.А. Федоткин – человек в науке совсем не случайный... Его работа отличается от того, что мы привыкли связывать с представлением о теории вероятностей, поскольку она ещё со старых времён гордится высоким уровнем теоретических результатов. Здесь ориентация несколько другая... если наш совет и ВАК утвердят его, то М.А. Федоткин в своей дальнейшей деятельности в таком огромном и промышленном городе, каким является Горький, будет первым доктором по этой специальности...»

Может быть, в таком городе, где нужны приложения и где имеется определённый вкус к решению не только теоретических, но и важных практических задач, всё это будет полезно...»

В 1969 г. М.А. Федоткин познакомился с А.А. Ляпуновым и С.В. Яблонским. Михаил Андреевич подробно рассмотрел их методологическую работу по управляющим кибернетическим системам [3] и начал обдумывать новый подход к построению, анализу и оптимизации вероятностных моделей эволюционных экспериментов с управлением. Подход оказался эффективным и используется в последних работах М.А. Федоткина и его учеников.

#### **4. От детерминизма к методам теории вероятностей**

До того как методология М.А. Федоткина была признана в профессиональной научной среде, методы управляемых случайных процессов обслуживания рассматривались на научных конференциях и семинарах всесоюзного значения. Но эти методы основывались на формальном описании статистических и функциональных связей между входами и выходами наблюдаемой реальной системы обслуживания. Иначе говоря, система обслуживания изучалась с позиции «чёрного ящика». Так это обычно делается в классических задачах автоматического регулирования.

Детерминированный взгляд полезен, однако интересно отметить, что при описании сложной действительности он является приближённым.

Французский механик Пьер Симон Лаплас – отец детерминированной концепции – писал в 1814 г.: «Ум, которому были бы известны на данный момент все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составных частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движения всех величайших тел Вселенной наравне с движениями легчайших атомов. И не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверно, и будущее, так же, как и прошедшее, предстало бы перед его взором. То есть всеобъемлющий ум охватил бы все условия и предсказал бы будущее».

Случайные факторы всегда было принято считались несущественными. Но, как известно, простая функциональная зависимость температуры идеального газа от давления есть суммарный результат соударений всех частиц о стенки резервуара. При этом число таких частиц и их скорости, очевидно, носят неопределённый и стохастический характер. Это приводит к очень малым отклонениям функциональной зависимости, которые пока не регистрируются современными приборами, измеряющими давление и температуру.

Оказалось, что классическое уравнение в частных производных Бюргерса (1875–1981), известное во многих областях прикладной математики, описывает эволюцию поля скоростей для гидродинамических потоков частиц и учитывает

как нелинейный характер распространения волн, так и диссипацию энергии. Это уравнение используется в акустике, оптике и космологии, применяется при гидродинамических предельных переходах для систем взаимодействующих частиц и т.д.

Сейчас уравнение Бюргерса служит полигоном для применения и проверки на эффективность современных методов теории вероятностей.

В 1999 г. профессор Римского университета Е. Орзингер на кафедре ПТВ факультета ВМК ННГУ изложил проблему предельных теорем при решении уравнения Бюргерса со случайными начальными данными.

#### **5. Решаемые задачи**

Будучи молодым учёным, М.А. Федоткин изучал динамику управления детерминированными потоками машин на пересечении магистралей Горького и Москвы, представляя результаты как исследование некоторой системы массового обслуживания, и начал затем искать новые задачи прикладного характера.

Он стал заниматься решением следующих задач: управляемые случайные процессы, нелокальное описание маркированных точечных процессов, алгоритмическое и адаптивное управление конфликтными потоками требований в системах обслуживания с переменной структурой, кибернетический подход к построению, анализу и оптимизации вероятностных моделей эволюционных экспериментов с управлением, теория пространственных и временных характеристик случайных потоков неоднородных требований.

По результатам решения задач Михаил Андреевич опубликовал более 380 работ и пять учебников в центральных изданиях [4–8].

#### **6. Всеобъемлющий взгляд на мир**

Как верующий в Бога человек, конкретную религию М.А. Федоткин рассматривает в виде одной из моделей принятия Всевышнего разума. Для верующего человека крайности неприемлемы, а золотая середина Богу угодна. Поэтому с 1979 г. учёный стал исповедовать такое мировоззрение при изучении явлений природы и поведения человека, когда детерминированный и статистический подходы должны иметь право на существование в единой упряжке жизненных связей.

На основе такого понимания мира М.А. Федоткин разрабатывает кибернетический подход к построению, анализу и оптимизации вероятностных моделей эволюционных экспериментов с управлением. В упрощённом виде этот подход можно применить для моделирования жизни и поведения человека.

Есть и другой подход, противоположный детерминированному: в работе «Творческий путь» В.С. Королюк [9], который являлся апологетом случайности, излагает этот вопрос иначе – на основе только вероятностного подхода.

Новое направление, предложенное М.А. Федоткиным, связано с созданием теории управляе-

мых систем обслуживания с переменной структурой обслуживания квазирегенерирующих потоков.

Учёный убеждён в том, что полезно посмотреть на мир более широким взглядом, учитывающим случайные факторы.

В настоящее время М.А. Федоткин и его ученик д.ф.-м.н. А.В. Зорин готовят к изданию научную монографию, в которой впервые успешно продемонстрируется кибернетический подход к построению, анализу и оптимизации вероятностных моделей эволюционных систем управления конфликтными потоками разнотипных требований [10].

Данная монография написана на основе результатов исследований одного из коллективов Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, которым руководит М.А. Федоткин. В этой книге используются оригинальные методы, совокупность которых характеризует научную школу по теории управляемых конфликтных систем массового обслуживания неоднородных требований.

Ещё раз подчеркнём, что в развитии Нижегородской (Горьковской) школы по теории управляемых конфликтных систем массового обслуживания можно выделить следующие этапы:

- 1) динамические системы управления транспортными потоками;
- 2) теория управляемых систем с переменной структурой;
- 3) адаптивные стохастические системы управления;
- 4) маркированные точечные процессы и теория надежности;
- 5) теория функционалов на траекториях случайных процессов;
- 6) кибернетический подход к построению, анализу и оптимизации вероятностных моделей эволюционных экспериментов с управлением.

Таким образом, в монографии впервые рассмотрены стохастические модели процессов обслуживания с разделением времени при управлении конфликтными потоками неоднородных требований.

## 7. Эволюция мира и жизни

Эволюция конкретного природного явления происходит при постоянном интуитивном выборе стратегии поведения особи на основании её внутреннего свойства (генетической памяти) и приобретённой ею информации. Человек в решающий момент времени принимает решение на основе своего генома, воспитания, образования, предыдущих проб и ошибок.

Жизнь человека протекает в различных обстоятельствах и условиях, некоторые из которых мы не понимаем, и никогда никто их сущность не объяснит. Такого рода обстоятельства люди называют случайными условиями и не могут даже представить себе множество всех случайных факторов, которые действуют на конкретный эксперимент или систему.

Это не следует путать с условиями, которые мы не можем пока объяснить из-за отсутствия

достоверной внешней информации и наших ограниченных познаний. Факторы, которые мы называем случайными, объективно были, есть и будут.

В квантовой механике нельзя точно и одновременно знать величину импульса частицы и её место нахождения, или другой всем известный пример – не существует способа, который точно определит момент времени распада данного ядра урана. Однако можно познать результат суммарного действия случайных факторов на некоторые характеристики реальных явлений и процессов.

Лауреат Нобелевской премии Макс Борн (1882–1970) придерживался аналогичной точки зрения.

Так устроен мир. Так случайные факторы обеспечивают многообразие и неопределённость в формировании и законов природы, и жизни конкретного человека.

## 8. Пример модели жизненной судьбы

Судьбу самого Михаила Андреевича Федоткина можно представить в виде векторного случайного процесса с непрерывным временем или в виде семейства векторных траекторий.

Для всех реализаций Божьей судьбой назначается конечное и небольшое число стробирующих непродолжительных отрезков времени. В такие моменты человек делает выбор из некоторого небольшого семейства волевых траекторий из всего множества назначенных судьбой возможностей. Детерминированные и случайные факторы действуют на промежутке между двумя соседними стробирующими интервалами, дополнительно отбирая новое семейство траекторий уже из семейства волевых траекторий [1, с. 75].

Интуитивный выбор, детерминированные и случайные факторы существенно влияют на жизнь человека в дальнейшем, пока он не уйдёт в мир иной. Число стробирующих моментов и каждый из этих интервалов для конкретного человека являются случайными. В среднем на жизненном пути таких моментов, скорее всего, бывает не более 50 раз.

## 9. Обсуждения, проблемы и споры

Изложенную точку зрения Михаил Андреевич никогда не скрывал от окружающих. Начиная с 1985 г. он не один раз знакомил с ней учёных, учеников, друзей, участников различных семинаров и международных конференций. В частности, он об этом рассказывал (в менее доступном варианте) в 2001 г. на своём шестидесятилетнем юбилее в НИИ прикладной математики и кибернетики.

Большое значение М.А. Федоткин придаёт личным беседам и спорам с учёными о проблемах построения математических моделей. Например, он говорил об этом со своим коллегой В.А. Талановым (даровитый преподаватель кафедры математической логики и высшей алгебры факультета ВМК ННГУ), когда они пешком возвращались из университета домой, а также с однокурсником-декабристом А.Д. Юнаковским (проф., сотрудник

лаборатории вычислительных методов в физике плазмы и СВЧ-электроники ИПФ РАН), которому оппонировал докторскую диссертацию.

Проблемы математического моделирования жизни и поведения человека, вопросы веры, религий, судьбы, случайности, закономерности и интуиции Михаил Андреевич неоднократно обсуждал в неофициальных и душевных разговорах со своим учителем гениальным инженером и учёным в области теоретической кибернетики Ю.И. Неймарком, когда Юрий Исаакович после 85-летнего юбилея готовил к изданию свои замечательные стихи, написанные в стиле верлибр. Ю.И. Неймарк затем опубликовал два сборника философских стихотворений. В них можно, например, найти слова: «Судьба – характер и душа, которые ты сам себе соорудил из кирпичей, дарованных природой...» [11, с. 51], а также в стихотворении «О вере, Творце и Боге» написано: «Воздадим хвалу чуду природы: душе и интеллекту человека» [12, с. 147].

### 10. Понимание и одобрение нового направления в науке

В 1978 г. Ю.И. Неймарк в своей монографии «Динамические системы и процессы управления» описал конфликтные системы массового обслуживания со ссылкой на работы М.А. Федоткина [13, с. 334]. Профессор В.А. Твердохлебов (специалист в области механического оборудования летательных аппаратов, гл. конструктор и зам. ген. директора объединения «Вымпел») в 2011 г. во время долгих дискуссий при проведении XVI Международной конференции по проблемам теоретической кибернетики также с пониманием отреагировал на высказанную Михаилом Андреевичем точку зрения по вопросу построения математических моделей.

На конференции, посвящённой 80-летию юбилею профессора Федоткина, ректор ННГУ Е.В. Загайнова отметила, что из шести десятилетий четыре Михаил Андреевич посвятил заведыванию своей кафедрой ПТВ и является в ННГУ своеобразным аксакалом в лучшем смысле этого слова, а президент ННГУ Р.Г. Стронгин сказал, что М.А. Федоткин выработал новый взгляд на науку и распознавание в теории вероятностей. Михаил Андреевич – создатель нетрадиционных математических моделей, а кроме того – человек, составляющий историю нашего университета в лицах [14, 15].

### Литература

1. Федоткин, М.А. Траектория судьбы: Историко-биографический очерк / К 70-летию М.А. Федоткина. К 25-летию кафедры прикладной теории вероятностей факультета вычислительной математики и кибернетики ННГУ. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2011. 113 с.
2. Неймарк, Ю.И. Метод точечных отображений в теории нелинейных колебаний. М. : Наука, 1973. 472 с.
3. Ляпунов, А.А., Яблонский, С.В. Теоретические проблемы кибернетики // Проблемы кибернетики. Вып. 9. М. : Физмат, 1963. С. 5–22.
4. Федоткин, М.А. Основы прикладной теории вероятностей. М. : Высшая школа, 2006. 368 с.
5. Федоткин, М.А. Модели в теории вероятностей. М. : Наука : Физматлит, 2012. 608 с.
6. Зорин, А.В., Федоткин, М.А. Методы Монте-Карло для параллельных вычислений. М. : МГУ, 2013. 192 с.
7. Федоткин, М.А. Лекции по анализу случайных явлений. М. : Наука : Физматлит, 2016. 464 с.
8. Федоткин, М.А. Нетрадиционные проблемы математического моделирования экспериментов. М. : Наука : Физматлит, 2018. 424 с.
9. Королюк, В.С. Творческий путь. Киев : Институт математики НАН Украины, 2009. 368 с.
10. Федоткин, М.А. Стохастические модели процессов обслуживания с разделением времени. 2021. 319 с. [Готовится к изданию]
11. Неймарк, Ю.И. Перед заходом Солнца: Стихотворения. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2005. 105 с.
12. Неймарк, Ю.И. Трагедия и счастье жизни: Стихотворения. Н. Новгород : Изд-во ННГУ, 2006. 160 с.
13. Неймарк, Ю.И. Динамические системы и процессы управления. М. : Наука, 1978. 336 с.
14. Панкрашкина, Н.Г. Жизненная правда и влюблённость в науку. К 80-летию со дня рождения М.А. Федоткина // Газета «Нижегородский университет». Н. Новгород [в печати].
15. Панкрашкина, Н.Г., Хроматов, В.Е. Развитие методов математического моделирования в трудах Ю.И. Неймарка. К 100-летию со дня рождения // Материалы XXVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М. : ТРП, 2021. С. 179–186.
16. Хроматов, В.Е., Панкрашкина, Н.Г. Вклад научного наследия Нижегородской школы механиков в становление и развитие специальности «Динамика и прочность машин» // Материалы XXV Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. М. : ТРП, 2019. Т. 1. С. 217–220.



# Стресс. И не только об эндорфинах

С.Б. Парин

Национальный исследовательский Нижегородский университет им. Н.И. Лобачевского; email: parins@mail.ru

Почти полвека прошло с открытия эндогенной опиоидной системы (ЭОС), а реальные знания об ее уникальных свойствах до сих пор остаются уделом узкого круга специалистов. В то же время в широком обиходе (к сожалению, в том числе и научном) циркулируют фантастические слухи о волшебных свойствах «эндорфинов». Представления о «гормонах счастья» – далеко не самые нелепые из этих баек. В конце концов, мы уже благополучно миновали волну сходных фейков по поводу серотонина, дофамина и даже адреналина. Схлынет и эндорфиновая волна. Важно другое: добиться максимально широкого распространения накопленных знаний об этой уникальной системе управления функциями организма среди врачей, нейробиологов, физиков, специалистов по когнитивной науке и даже психологов.

Именно поэтому я с благодарностью принял несколько экстравагантное предложение оргкомитета конференции представить в качестве доклада презентацию моей недавно вышедшей книги «Стресс, боль и опиоиды. Об эндорфинах и не только». Дополнительным аргументом в пользу такого решения стало то, что с момента выхода книги в начале весны 2021 года она 2,5 месяца удерживалась в «топ 5» изданий на интернет-платформе «Лабиринт» и получила весьма лестные отзывы специалистов.

В основе этого научно-популярного издания – современные представления об эндогенной опиоидной системе (в просторечии – системы эндорфинов), которая представляет собой комплекс клеток (отнюдь не только нейронов), продуцирующих разнообразные опиоидные пептиды (и снова отнюдь не только эндорфины, но и множество других пептидов со схожими свойствами – более 50 видов), и три группы специализированных опиатных рецепторов. Прежде всего, в названии зашифрованы свойства этого семейства информонов, сходные со свойствами алкалоида опиоидного мака (морфина) и его природных и синтетических аналогов, получивших название опиатных (или наркотических) анальгетиков. В традиционной и современной медицине эти лекарственные препараты по справедливости считаются наиболее эффективными болеутоляющими средствами. В то же время они являются сильнейшими нейротоксинами, вызывающими смертельное, как правило, неизлечимое заболевание – опиатную наркоманию.

По существу, именно загадочная двойственность опиатов привела к открытию ЭОС. На протяжении двух веков химики и фармакологи искали вещества, по способности облегчать болевой синдром не уступающие морфину и его производным, но не обладающие наркотическими свойствами.

И только во второй половине XX века стало очевидным, что такие поиски в принципе бесперспективны.

На заре «опиоидной эры» Нобелевский лауреат Роже Гийом (в американской традиции – Роджер Джиллемин) предсказал, что открытие опиоидных пептидов позволит раскрыть секреты боли и обезболивания, стресса и зависимостей, обучения и памяти. Действительность оказалась существенно богаче.

Прежде всего, сегодня стало очевидным, что опиоидная система является абсолютно древнейшей регуляторной системой в мире живых организмов (по крайней мере, на нашей планете). То, что опиатные рецепторы обнаружены у всех животных, сегодня уже воспринимается как банальность. Наличие опиоидных пептидов у растений тоже неудивительно, ведь мы более полувека знаем, что у растений достаточно развита нервная система, и трудно найти, например, медиаторы, которые встречаются в нашем организме, но не встречаются в растительном царстве. ЭОС у грибов – а почему бы и нет, коли эти живые существа в эволюции заняли промежуточную нишу между животными и растениями. Но обнаружение опиатных рецепторов у бактерий и даже (не к ночи будь помянуты!) вирусов стало настоящей научной сенсацией в начале XXI века.

Уникальная эволюционная древность опиоидной системы позволяет объяснить многие выясненные со времени ее открытия (1973–1975) свойства этого регуляторного комплекса. Сегодня известно, что ЭОС участвует в формировании гипобиотических состояний, оказывает минимизирующее действие на различные физиологические параметры и, самое важное, служит своеобразным «размыкателем» в системах с отрицательными обратными связями. Учитывая, что *feed back* связи являются главным элементом адаптивных настроек в живых системах, такой откровенно антиадаптивный механизм на первый взгляд кажется эволюционным нонсенсом, однако первый взгляд – далеко не лучший способ научного познания.

Наивно думать, что адаптация к постоянно меняющимся условиям окружающей нас (и отнюдь не дружественной нам, надо признать) среды – единственный и оптимальный способ обеспечить выживание. Нередки ситуации, когда приспособленчество (адаптация = приспособление) фатально, и необходимо противодействие меняющимся условиям, борьба, защита. И в таких условиях тонкие настройки программы действий, постоянно корректирующиеся по текущему промежуточному результату, категорически неэффективны. Не до нюансов. Требуется запуск уже сформированных, как правило – генетически де-

терминированных, программ. И таких примеров – масса.

В качестве одного из них в своей книжке я рассматриваю боль. Боль – в обиходе сигнал о повреждении. Боль с позиций системной (кибернетической, по сути) психофизиологии – сигнал об избыточном, чрезмерном рассогласовании между идеальным – эталонным – информационным образом тела и реальным информационным образом тела с имеющимся повреждением. Это рассогласование требует осуществления программы действий, направленных на устранение повреждения или его последствий. Наивно искать здесь элементы адаптации. Классической аксиоме нейрофизиологии: к боли адаптироваться нельзя! – уже больше ста лет. Закономерно боль исключена из пресловутого списка шести сенсорных систем. Нет такого физического или химического фактора, как боль. Свет есть, запах есть. Соответственно, есть зрительная и обонятельная системы. Любой тип рецептора настроен на детектирование физического или химического (по сути, разница только в масштабах) фактора среды. А боль (ноцицепция) – это информационный образ. Именно поэтому сегодня только закоренелые двоечники или не менее закоренелые бизнесмены от науки продолжают обсуждать мифические ноцицепторы («болевые рецепторы»). Невозможно и лишено всякого смысла существование периферического детектора центрального информационного образа.

Тогда что же такое обезболивание (аналгезия)? Это прерывание сигнала о чрезмерном рассогласовании между идеальным и реальным информационным образом тела. И ЭОС здесь проявляет свои свойства в полной мере. Неслучайно до сего дня наиболее эффективными анальгетиками являются синтетические или природные аналоги опиоидных пептидов – опиатные алкалоиды (увы, наркотики). И действие у них – категорически центральное, в отличие от периферических анестетиков.

Еще более вопиющим примером влияния открытия ЭОС на устоявшиеся мифы и легенды когнитивной науки является проблема стресса. С легкой руки создателя теории стресса – гениального австро-канадского эндокринолога Ганса Селье – стресс принято рассматривать в качестве адаптационного синдрома. При этом опять же в традициях теории стресса он характеризуется как неспецифическая реакция на повреждение или угрозу повреждения. Не правда ли, странная перспектива: приспособиться (адаптироваться) к тому, что тебя убивают или собираются убить? Мы не вправе критиковать или тем более осуждать первоходцев за их ошибки! Первый торит путь в неведомое. Нам проще. Но мы на своем горьком опыте знаем, что происходит даже с великой теорией, которая объявляется правильной только потому, что она верна. Селье формулировал теорию стресса в 30-х годах XX века. За почти век в науке, как ни странно, появилось много новых знаний. В том числе, как вы понимаете, я говорю об открытии ЭОС.

Сегодня стало очевидным, что эта регуляторная система в существенно большей мере направлена не на адаптацию в конкретном, локальном смысле, а на преодоление обстоятельств вопреки им, на защиту от них. Эта защита обеспечивается через запуск отработанных миллионами лет эволюции неспецифических программ, пусть существенно менее эффективных, чем специализированные, зато не требующих предварительного обучения. Здесь просматривается прямая аналогия с неспецифическим иммунитетом, также менее эффективным, чем специфический, но срабатывающим моментально, как только сомнительный объект появился в пределах досягаемости.

Стресс является характернейшим примером такого рода неспецифической защиты от любого повреждения или его угрозы. При стрессе типовая генетически детерминированная программа запускается при первом же сигнале тревоги от лимбической системы, отвечающей, как известно, за быструю аффективную оценку ситуации. ЭОС в этих условиях обеспечивает, во-первых, отключение несвоевременных корректирующих сигналов по отрицательным обратным связям, во-вторых, «загрубление» избыточных сенсорных сигналов и, в-третьих, ингибирование чрезмерной активности двух других стресс-реактивных систем: симпатoadреналовой (САС) и гипоталамо-гипофизарно-адреналовой (ГГАС). Сегодня уже невозможно рассматривать механизмы стресса без участия ЭОС.

В книге я привожу множество экспериментальных доказательств этих положений. Например, дисперсия и вегетативных, и сенсорных показателей на большой выборке испытуемых существенно (в разы!) уменьшается при стрессе. Мы все как бы становимся «близнецами-братьями», и это естественно, ведь генетически мы все – одна семья. Значительно (и снова в разы!) повышаются дифференциальные сенсорные пороги. И снова это естественно, ведь программа защиты уже запущена, и излишне точные сигналы о текущих событиях только мешают ее реализации. Весьма показательны данные, полученные при обследовании опиатных (в основном героиновых) наркоманов. Они сами на себе поставили смертоносный эксперимент, фактически разрушив собственную ЭОС. В результате за пределами действия очередной дозы они живут в непрекращающемся стрессе.

В одной из глав я позволил себе самоцитирование: стресс – неспецифическая защитная стадийная системная редуцированная психофизиологическая реакция на повреждение или его угрозу. В этом современном определении стресса каждый параметр подтверждается конкретными фактами.

Впрочем, наберусь наглости посоветовать вам познакомиться с «первоисточником». Ведь в этом, по замыслу оргкомитета конференции, и заключается смысл данной презентации.

## Литература

Парин С.Б. Стресс, шок и опиоиды. Об эндорфинах и не только. Минск : Дискурс, 2020. 208 с.

# Программный инструментарий разметки данных для обучения алгоритмов классификации событий на изображениях кальциевого имиджинга

А.М. Пахомов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

email: pakhomov@ipfran.ru

Для исследования функциональной динамики живых когнитивных систем важно обладать инструментальными средствами для решения экспериментальных задач.

Одним из методов исследования живых когнитивных систем является флуоресцентная микроскопия. Это связано с тем, что самые распространённые глияльные клетки – астроциты – хоть и являются электрически невозбудимыми, но также участвуют в процессах, связанных с передачей сигналов, генерируя кальциевые сигналы [1]. А кальциевые сигналы можно легко визуализировать при помощи флуоресцентных маркеров.

Во время генерации кальциевых сигналов астроцит способен воздействовать на сигнальные функции нейронов, регулируя возбудимость нейронной мембраны и эффективность передачи сигналов между нейронами [2]. Для исследования взаимодействий между нейронами и астроцитами важно верно различать астроцитарные кальциевые сигналы на фоне шумов изображения и биологического шума.

Объём данных, полученных при флуоресцентной микроскопии, очень велик [3] как по количеству изучаемых клеток, так и по времени наблюдения, поэтому актуальна задача алгоритмической обработки изображений для получения некоторых численных метрик. Для этого могут быть применены алгоритмы машинного обучения (МО), осуществляющие классификацию объектов и событий.

Чтобы алгоритм машинного обучения научился правильно классифицировать объекты и события, за него это задачу сначала должен решить человек. То есть человек должен подготовить данные для машинного обучения. В настоящее время активно развивается новый сегмент в области машинного обучения – разметка данных, data labelling [4]. Разметка данных, как правило, самая трудозатратная задача при создании систем искусственного интеллекта: надо без ошибок разметить тысячи единиц информации. Поэтому очень важно сделать процесс разметки удобным для пользователя, предоставив для этого соответствующие инструментальные средства.

## Постановка задачи

В ходе эксперимента астроцит находится в плоскости подложки, и в каждый момент времени с шагом в 0,5 секунды сохраняется файл изображения, содержащий интенсивности свечения кра-

сителя, связанного с кальцием, в плоскостях, параллельных плоскости подложки.

Видеоряд обрабатывается реализованным в среде Matlab алгоритмом, производящим фильтрацию видео, выравнивание изображения, выделение границ областей [5]. На основе оценки активности пикселей выполняется объединение соседних пикселей в области, предположительно соответствующие отдельным клеткам. Затем для каждого момента времени интенсивности пикселей в каждой области усредняются и сохраняются в csv-файл.

Задача состоит в том, чтобы на истории изменения интенсивности в выбранной области пользователь имел возможность отметить участки событий кальциевой активности, а также участки, связанные с другими событиями (указать, когда участок начинается и заканчивается и что происходит на данном участке).

В процессе предварительного анализа данных биологического шума и данных, содержащих астроцитарные кальциевые события, было обнаружено, что локальные максимумы сигнала интенсивности могут наблюдаться в следующих случаях:

- значительные изменения концентрации цитоплазматического кальция (астроцитарный кальциевый сигнал);
- изменения интенсивности, связанные с движением клетки;
- движение ионов кальция по отросткам;
- переход интенсивности на другой базовый уровень интенсивности (связано с изменением фокуса);
- реакция на отдалённые события.

Программное средство должно иметь возможность устанавливать пометки одного из этих классов.

## Графический редактор кальциевых событий

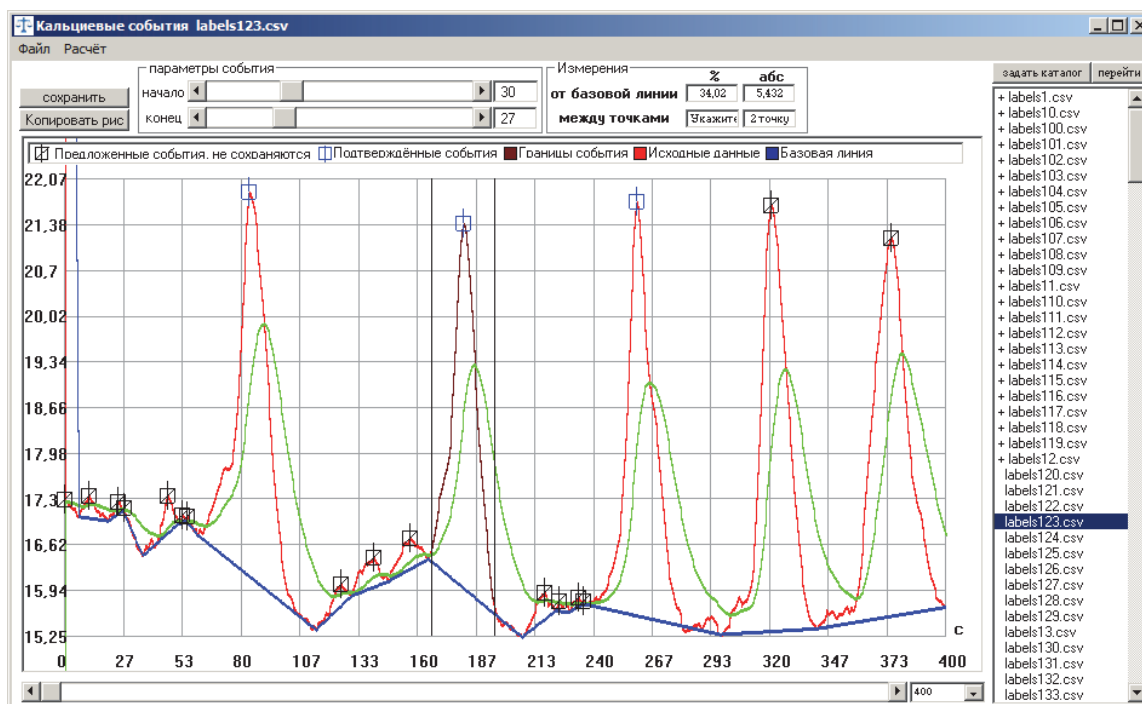
Разметка областей и редактирование границ событий производится в окне графического редактора (рисунок). Рабочее окно программы редактирования кальциевых событий включает в себя следующие элементы:

1 – область графиков, в которой отображаются линия интенсивности, средняя и базовая линии, предложенные и подтверждённые события;

2 – список файлов, в котором производится выбор клетки;

3 – поле параметров события, в котором редактируются параметры выбранного события;

4 – поле измерений.



Рабочее окно программы разметки событий:  
*a* – интенсивность, *b* – средняя, *в* – базовая линия

В поле измерений отображаются результаты измерений:

- высота от верхней точки пика до соответствующей находящейся под ней точки базовой линии для выбранного события (абсолютное и относительное значения);
- высота между выбранными точками линии интенсивности (абсолютное и относительное значения);
- длительность выбранного события в секундах.

Нажатию на области графика левой клавиши мыши можно добавить новое событие, если оно было пропущено алгоритмом предварительного детектирования событий.

Нажатию на области графика правой клавиши мыши производится указание точек, между которыми проводится измерение. После первого нажатия в поле измерений отображается надпись «Укажите 2-ю точку». Тогда в области графика нажатием правой клавиши мыши нужно указать положение второй точки.

### Алгоритм поиска событий

В процессе предварительного детектирования событий для облегчения задачи пользователя формируется список предложенных событий. Пользователю достаточно выбрать из предложенных локальных максимумов только те, которые, по его мнению, соответствуют критериям событий кальциевой активности.

Алгоритм предварительного выделения кальциевых событий основан на применении подхода, включающего в себя два этапа:

- нахождение средней линии с применением алгоритма фильтрации с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтр). Средняя линия

характеризуется составляющей сигнала, медленно изменяющейся во времени. Поведение сигнала интенсивности характеризуется отклонением от средней линии и затем возвращением снова к средней линии.

$$SL_j = SL_{j-1} \cdot k + (1 - k) \cdot \text{Intensity}_j,$$

где  $k$  – коэффициент фильтрации;

- поиск максимумов участков линии интенсивности, находящихся над средней линией.

### Вычисление базовой линии

Для оценки высоты события кальциевой активности необходимо вычислить некоторый базовый уровень, от которого проводится измерение.

Для поиска базовой линии сигнала:

- были найдены локальные минимумы линии интенсивности (минимумы участков линии интенсивности, находящихся под средней линией);
- произведена кусочно-линейная интерполяция участков между найденными локальными минимумами:

$$BL_j = y_1 + \frac{(j - x_1) \cdot (y_2 - y_1)}{x_2 - x_1}, j = x_1 \dots x_2,$$

где  $x_1, y_1$  – координаты первого минимума;  $x_2, y_2$  – координаты второго минимума.

### Сохранение результатов разметки кальциевых событий

В качестве выходных данных алгоритм формирует списки параметров событий (отклонение максимального значения события, длительность события) – по событиям кальциевой активности и по событиям, не связанным с кальциевой активностью (биологический шум, уход фокуса). Полученные данные будут использованы в качестве входных данных алгоритма машинного обучения.

Результаты разметки сохраняются в исходный csv-файл и при следующем его открытии также загружаются.

Также реализована выгрузка параметров выделенных кальциевых событий по всем клеткам текущего каталога в новый файл формата csv. В его колонке **NumCell** – номер клетки, в колонке **AbsVal** – абсолютное значение расстояния от верхней точки пика до соответствующей находящейся под ней точки базовой линии, в колонке **Perc** указано, на сколько процентов верхняя точка пика выше соответствующей находящейся под ней точки базовой линии, в колонке **Duration** – длительность пика в секундах, **Value** – класс события. Полученный файл может быть использован для обучения какого-либо алгоритма МО.

Пример таблицы параметров событий:

NumCell	AbsVal	Perc	Duration	Value
40	1,723	6,175	25	2
40	3,629	11,432	39	1
40	1,099	3,245	15	2
83	1,708	2,653	12,5	2
83	1,6	2,934	14	2

### Заключение

Основная проблема при разработке различных программных средств, использующих машинное обучение, – подготовка данных.

Разработанные средства для разметки событий могут упростить задачу автоматизированной обработки данных, полученных при флуоресцентной микроскопии для анализа взаимодействий между нейронами и астроцитами.

Также в дальнейшем возможно использование инструментального средства в различных направлениях биологии, изучающих движение веществ в биологических структурах.

Репозиторий «TruEvent» доступен на Github (<https://github.com/TVK-dev/TruEvent>).

### Литература

1. *Charles A.C.* Glia-neuron intercellular Ca<sup>2+</sup> signaling // *Dev. Neurosci.* 1994. V. 16. P. 196–206.
2. *Halassa M., Haydon P.* Integrated Brain Circuits: Astrocytic Networks Modulate Neuronal Activity and Behavior // *Annual Review of Physiology.* 2010. V. 72, № 1. P. 335–355.
3. *Axelrod D.* *Journal of Biomedical Optics.* 2001. V. 6, iss. 1. P. 6–13.
4. *Johnson L.* What is the difference between labeled and unlabeled data? // *Stack Overflow.* 4 October 2013. Retrieved on 13 May 2017.
5. *Kustikova V., Krivososov M., Pimashkin A. et al.* Computer vision software for calcium signaling in astrocytes // *International Conference on Analysis of Images: Social Networks and Texts.* 2018. P. 168–179.

# Пик-волновая активность подавляет гиппокампальные ripples у крыс WAG/Rij

Д.А. Перевознюк<sup>\* 1,2</sup>, I. Iotchev<sup>3</sup>, Ш.С. Узаков<sup>1</sup>, Е.М. Руцкова<sup>1</sup>,  
К.С. Смирнов<sup>1</sup>, Е.Ю. Ситникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва  
\* email: perevoznukd@mail.ru

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России, г. Москва

<sup>3</sup>Eötvös Loránd University (Ethology Department), г. Будапешт, Венгрия

Гиппокамп – часть старой коры головного мозга, которая играет ключевую роль в формировании памяти и обучения. В гиппокампе лабораторных крыс часто наблюдают высокочастотные всплески ритмической активности, так называемые ripples. Наличие гиппокампальных ripples может быть связано с развитием эпилепсии. Наша работа была нацелена на выявление ассоциаций между локальными гиппокампальными ripples и генерализованными пик-волновыми разрядами у крыс с генетической предрасположенностью к пик-волновой (абсансой) эпилепсии. Использован стандартный алгоритм автоматического выделения ripples на интракраниальных записях локальной активности зубчатой извилины гиппокампа в свободном поведении. Обнаружено, что в течение пик-волновых разрядов число ripples было на 10 % ниже по сравнению с фоном, а за 5 с до начала пик-волновых разрядов – на 2 % ниже. Возможно, что пик-волновая активность препятствует появлению гиппокампальных ripples.

Работа нейронных сетей головного мозга вызывает большой интерес у нейрофизиологов и разработчиков искусственного интеллекта. В норме нейронные сети осуществляют обработку информации и обеспечивают реализацию высших нервных функций. Патологические процессы, которые вызваны развитием эпилепсии, сопровождаются гипервозбудимостью отдельных нейронов и гиперсинхронизацией нейронных сетей. Источник эпилептической активности может быть локальным, как в случаях фокальных эпилепсий [1]. Например, при височной эпилепсии источник локализован в гиппокампе и лимбических структурах головного мозга. Эпилепсия может быть вызвана нарушением нейросетевой активности, и тогда она имеет первично генерализованный характер, то есть охватывает обширные области головного мозга и не имеет явного источника. Такова, например, пик-волновая (абсансная) эпилепсия, причиной которой являются нарушения в таламокортикальной нейронной сети. Пик-волновые разряды являются признаком нарушения функций таламокортикальной системы, т.е. таламокортикальной дизритмии [2].

Эпилептические процессы в нейронных сетях могут иметь глобальный и локальный характер. И даже в отношении пик-волновой (абсансой) эпилепсии нет полного понимания «глобальности» эпилептического процесса [3]. Пик-волновая (абсансная) эпилепсия во многом противоположна височной эпилепсии. Известно, что даже во время приступов пик-волновой эпилепсии гиппокампальные нейронные сети генерируют так назы-

ваемые ripples – эпилептиформную активность в виде высокочастотных всплесков [4].

Роль гиппокампа в формировании пик-волновой активности до сих пор остается невыясненной. Наша работа нацелена на решение этой проблемы, т.е. на выявление ассоциаций между локальными гиппокампальными ripples и генерализованными пик-волновыми разрядами у крыс с генетической предрасположенностью к пик-волновой (абсансой) эпилепсии.

## Метод регистрации ЭЭГ в свободном поведении с использованием глубоких (интракраниальных) электродов

Интракраниальные электроды – электроды, погруженные в толщу головного мозга для регистрации электрической активности в глубоких структурах (таламус и гиппокамп). Для регистрации локального сигнала от этих структур (биполярная регистрация) использовали скрученные попарно нихромовые нити в эмалевой изоляции (диаметр 80 мкм), кончики которых были срезаны под углом 45 градусов.

Хирургическую операцию по вживлению эпидуральных электродов проводили под общим хлоралгидратным наркозом (внутрибрюшинная инъекция 4% раствора хлоралгидрата в дозе 325 мг/кг). Вживление электрода в гиппокампальную область проводили с использованием электро-физиологического контроля расположения регистрирующего электрода, ориентируясь на ответ зубчатой извилины гиппокампа (AP –3.2; L 1.8; H 3.35–3.40), вызванный электрической стимуляцией перфорантного пути парными электродами (AP –6.8; L 3.4; H 2.25–2.95). Все координаты указаны в мм относительно брегмы согласно атласу [5]. После определения оптимальных координат для расположения гиппокампального электрода стимулирующие электроды из области перфорантного пути были извлечены. Одновременно имплантировали эпидуральные электроды в область лобной коры справа (AP 2, L 2) или соматосенсорной коры справа (AP –2, L 5). Разъем для подключения проводов к электродам фиксировали на кости черепа с помощью метилметакрилатного мономера. Послеоперационный период адаптации составлял 6–7 суток.

Запись электрической активности головного мозга у крыс проводили в условиях свободного

поведения, в плексигласовой клетке, расположенной в экранированной камере. Для регистрации активности от интракраниальных электродов использовали предусилитель (двухпроводное подключение) [7], подключенный к дифференциальному усилителю биопотенциалов NBL304 (Neurobiolab, Россия). Сбор данных производили при помощи АЦП L-Card (L-Card, Россия) и программы PowerGraph (PowerGraph, Россия). Для всех каналов частота оцифровки составляла 1000 Гц, а также применялись аппаратные фильтры: notch-фильтр 50 Гц составляющей, фильтр высоких частот (high-pass) – от 1 Гц.

После завершения эксперимента крысы были глубоко анестезированы с использованием летальной дозы 4% раствора хлоралгидрата. Их мозг извлечен и подвергнут гистологическому исследованию для верификации расположения интракраниальных электродов в соответствии с атласом мозга крыс [5].

### Метод автоматического выделения гиппокампальных ripples

Гиппокампальные ripples представляли собой короткие вспышки высокочастотной активности. Для их выделения использовали исходный гиппокампальный сигнал и спектр его мощности (рис. 1).

Критерии для выделения ripples были следующими [6]:

- частотный диапазон 100–200 Гц;
- продолжительность 0,01–0,1 с.

Нативный сигнал подвергся фильтрации в диапазоне частот 100–250 Гц. Далее определяли значение модуля амплитуды сигнала в каждый момент времени. Далее проводили оценку амплитудных свойств отфильтрованного сигнала, и его частотные характеристики не влияли на результаты анализа.

Вычисляли стандартное отклонение  $S$  сигнала по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2}{n - 1}},$$

где  $x_i$  – значение амплитуды в момент времени  $i$ ;  $x_{cp}$  – среднее значение амплитуды в каждый момент времени на протяжении всей записи,  $n$  – общее число значений амплитуд в каждый момент времени на протяжении всей записи.

Далее для каждого момента времени вычисляли отношение значения амплитуды сигнала к стандартному отклонению. Таким образом, сигнал был представлен в единицах стандартных отклонений, то есть был нормализован.

Результат этих преобразований показан на рис. 2, где на оси  $y$  показано стандартное отклонение, а по оси  $x$  – время в секундах от того момента, когда сигнал превысил 6 стандартных отклонений. Красным цветом показаны интервалы времени продолжительностью 0,01 и 0,1 с (минимальная и максимальная длительность ripple).

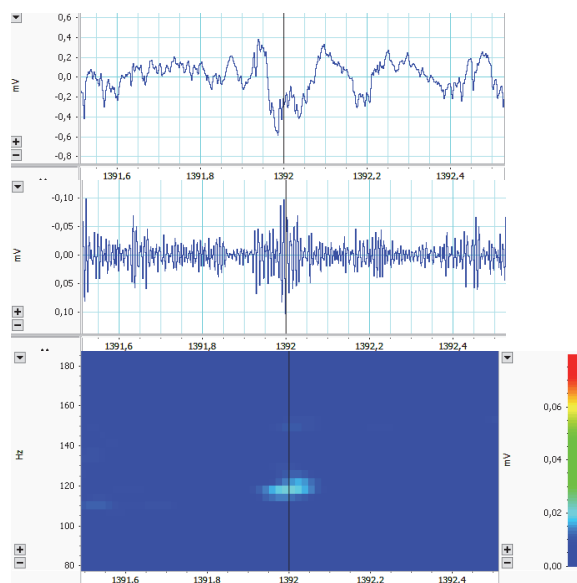


Рис. 1. Пример локального гиппокампального ripple (зубчатая извилина гиппокампа), зарегистрированный у крысы WAG/Rij в свободном поведении. Ось  $y$  – время в секундах. Верхний график – нативный гиппокампальный сигнал. Средний график – отфильтрованный сигнал (high-pass 100 Гц), где отчетливо виден ripple со средней частотой ~120 Гц. Нижний график – амплитудный спектр нативного сигнала в характерной частотной области (размер окна FFT = 256, перекрытие окон 93,5 %)

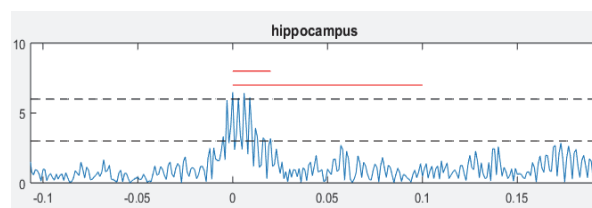


Рис. 2. Пример преобразованного гиппокампального сигнала (зубчатая извилина), содержащего «ripple». Ось  $y$  – время в секундах

### Ассоциации гиппокампальных ripples и пик-волновых разрядов

Пик-волновые разряды были выделены вручную на записях, полученных от эпидуральных электродов. Они представляли собой комплексы «пик – волна», где пики следовали с частотой 8–10 Гц; пик-волновые разряды имели резкое начало и продолжительность от 2 с (рис. 3).

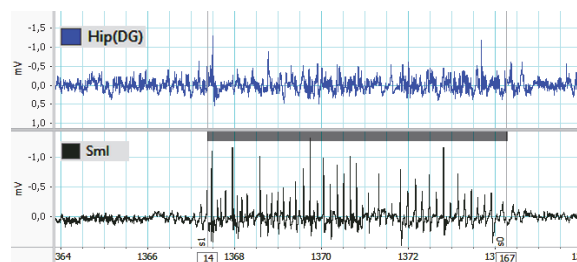
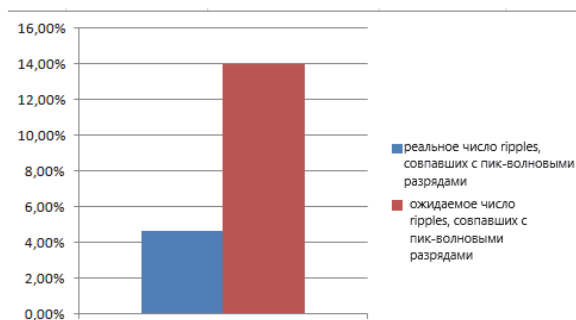


Рис. 3. Пик-волновой разряд, зарегистрированный у крысы WAG/Rij в свободном поведении. Паттерн «пик – волна» выявлен на эпидуральной записи из соматосенсорной коры (канал SmI) и отсутствует на интракраниальных записях в гиппокампе (канал Hip(DG), зубчатая извилина). Ось  $y$  – время в секундах

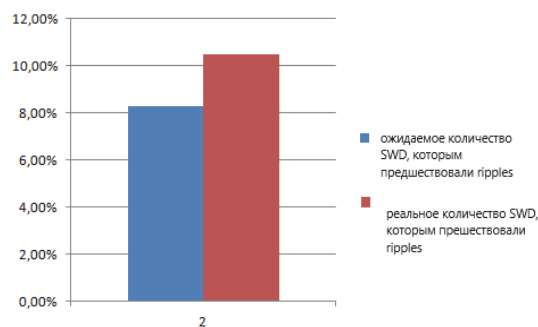


Проведена оценка частоты появления гиппокампальных ripples относительно частоты появления пик-волновых разрядов на протяжении всей записи, длящейся около полутора часов. Поскольку известно, что ripples [6] и пик-волновые разряды [4] появляются преимущественно в состоянии сна, можно пренебречь неравномерностью их распределения во времени. Сначала определяли общую продолжительность пик-волновых разрядов, а также проводили расчет процента времени пик-волновых разрядов относительно общей продолжительности записи. Далее вычисляли частоту появления ripples как отношение общего числа ripples к общей продолжительности записи. Путем умножения значения частоты появления ripples на общую длительность пик-волновых разрядов получали коэффициент, характеризующий число ripples, совпадающих по времени с пик-волновыми разрядами. При соблюдении условия, что пик-волновые разряды не влияют на появление ripples. Этот коэффициент сравнивали с реальным числом ripples, обнаруженных на гиппокампальном канале в течение пик-волновых разрядов (рис. 4).



**Рис. 4.** Соотношение числа ripples во время пик-волновых разрядов и ожидаемого числа ripples при условии, что пик-волновые разряды не влияют на их появление

Была исследована гипотеза о вовлечении гиппокампа в процесс инициации генерализованных пик-волновых разрядов. Для этого исследовали гиппокампаальные ripple в течение 5 с до момента начала пик-волновых разрядов. Использован вышеописанный аналитический подход для оценки вероятности попадания ripple в 5-секундный интервал перед пик-волновым разрядом (рис. 5).



**Рис. 5.** Соотношение числа ripples, наблюдавшихся в течение 5 с до начала пик-волновых разрядов, и ожидаемого числа ripples при условии, что пик-волновые разряды не влияют на появление ripples

Таким образом, ripples заметно реже (в нашем случае – на 10 %) появлялись во время пик-волновых разрядов (рис. 4). И незначительно чаще (рис. 5) – непосредственно перед пик-волновыми разрядами. Полученные результаты свидетельствуют о том, что пик-волновая активность препятствует появлению гиппокампаальных ripples.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-015-00242а).

## Литература

1. *Зенков Л.П.* Клиническая эпилептология (с элементами нейрофизиологии). М. : МИА, 2002. 416 с.
2. *Ситникова Е.Ю.* Таламо-кортикальная дизритмия и принципы её диагностики // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2020. Т. 28, вып. 3. С. 282–298.
3. *van Luijteleaer G., Sitnikova E.* Global and focal aspects of absence epilepsy: the contribution of genetic models // *Neurosci Biobehav Rev.* 2006. V. 30, № 7. P. 983–1003.
4. *Pearce P.S., Friedman D., Lafrancois J.J. et al.* Spike-wave discharges in adult Sprague-Dawley rats and their implications for animal models of temporal lobe epilepsy // *Epilepsy Behav.* 2014. V. 32. P. 121–131.
5. *Paxinos G., Watson C.* The Rat Brain in Stereotaxic Coordinates. New York : Acad. Press, 1986. 237 p.
6. *Gelinas J., Khodagholy D., Thesen T. et al.* Interictal epileptiform discharges induce hippocampal–cortical coupling in temporal lobe epilepsy // *Nat. Med.* 2016. V. 22. P. 641–648.
7. *Корицунов В.А.* Миниатюрный многоканальный преусилитель для регистрации электрофизиологической активности у свободноподвижных животных // *Журн. высш. нервн. деят.* 2008. Т. 58, вып. 1. С. 111–116.



# Эндогенные аномалии кардиоритма у пациентов с COVID-19

С.А. Пермяков<sup>1</sup>, С.А. Полевая<sup>1</sup>, М.М. Циркова<sup>1,2</sup>, Е.В. Еремин<sup>1</sup>, С.Б. Парин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Приволжский окружной медицинский центр, Нижний Новгород

## Введение

Изучение влияния COVID-19 на организм человека является одной из наиболее острых проблем медицины на настоящий момент. Трудоёмкость диагностики COVID-19 и невозможность оперативного контроля за состоянием вне клиники способствуют ухудшению эпидемиологической обстановки и увеличению нагрузки на систему здравоохранения в целом. Благодаря развитию мобильных устройств – регистраторов ритма сердца и телекоммуникационных технологий становится возможным проведение дистанционного скрининга опасных состояний на разных фазах болезни. Возможности скрининга обеспечиваются знаниями о COVID-специфичных режимах работы регуляторных систем.

В рамках сотрудничества между ННГУ имени Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород) и Приволжским областным медицинским центром (ПОМЦ) был проведен мониторинг функционального состояния у пациентов с диагнозом COVID-19. Ключевым методом являлась технология событийно-связанной телеметрии ритма сердца [1] в процессе разнообразных клинических мероприятий. На 86 % записей ритмограммы пациентов красной зоны ковидного госпиталя выявлены однотипные низкоамплитудные флуктуации RR-интервалов z-образной формы, названные кардиоспайками (рис. 1). В базе ритмограмм за 2015–2018 гг. (Интернет-сервис ННГУ «Когнитом», cogni-nn.ru) z-образные спайки присутствуют только в 3 % записей. Это дает основание предполагать, что кардиоспайки можно рассматривать как маркеры COVID-специфичных режимов работы регуляторных систем.

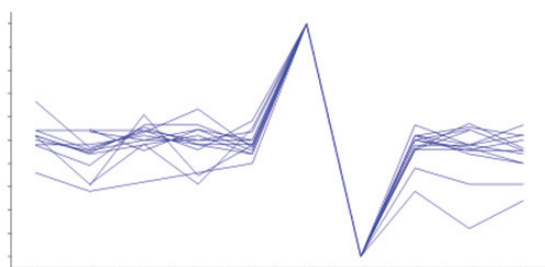


Рис. 1. Пример ансамбля нормализованных спайков различных обследуемых с диагнозом COVID-19

Однако для обоснования значимости этих аномалий в скрининге COVID-19 необходимо исключить риски программно-аппаратных искажений сигнала и, таким образом, подтвердить их эндогенную природу. Работа посвящена оценке роли техногенных факторов в формировании кардиоспайков на ритмограмме.

## Постановка задачи

Сердце в совокупности с системой регуляции ритма можно считать фазовым датчиком функционального состояния организма [2]. Оптимальный сигнал для отображения режимов работы физиологической системы – ритмограмма или диаграмма последовательно зарегистрированных интервалов времени между систолами желудочков миокарда (QRS-комплексов). Широкие диагностические возможности ритмограмм позволяют объективизировать функциональное состояние в различных областях, включая спортивную медицину и психофизиологию. В связи с этим для пациентов с COVID-19 при лечении и реабилитации в клинике в дополнение к обязательному комплексу обследований и процедур осуществляется регистрация ритмограмм с последующей обработкой на веб-платформе «Когнитом».

Типичная ритмограмма пациента с острым респираторным заболеванием, к которым относят COVID-19, характеризуется ригидизацией RR-интервалов [3, 4]. Однако только для пациентов с установленным диагнозом COVID-19 в сигнале от сенсорной платформы ZephyrSmart отмечаются особые низкоамплитудные аномалии – кардиоспайки (рис. 2).

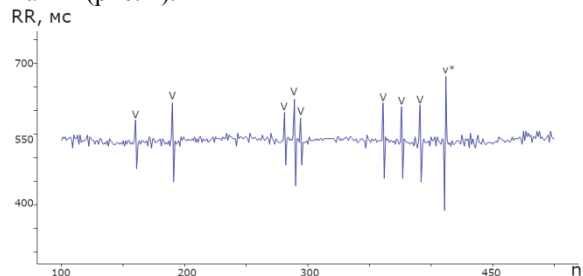


Рис. 2. Участок ритмограммы пациента с COVID-19 в 400 отсчётов, содержащий 9 эпизодов спайковых аномалий. Аномалии имеют характерный повторяющийся паттерн и разную амплитуду в диапазоне  $\pm 100$  мс от среднего значения

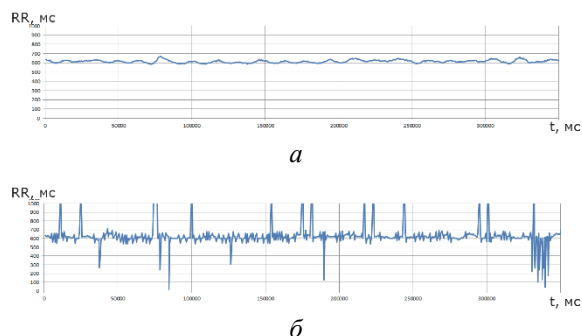
Спайковый паттерн отличает два последовательных (по номеру RR) скачка от среднего значения: за более длинным RR следует более короткий с дальнейшей незначительной релаксацией (см. рис. 1).

Необходимо исключить вероятность того, что аномалии связаны с особенностями регистрации и обработки сигнала в сенсорной платформе.

## Методология регистрации

Данные ZephyrSmart были верифицированы с помощью профессионального электрокардиографа Поли-Спектр-8 (Нейрософт). Регистрация данных на ZephyrSmart и Поли-Спектр-8 была синхронизирована по времени начала. При сравнении рит-

мограмм, полученных на разных приборах, выяснилось, что кардиоспайки на ритмограмме от ZephyrSmart не воспроизводятся на ритмограмме от Поли-Спектр-8 при общей высокой корреляции двух сигналов (рис. 3). Далее данные приведены в едином масштабе для упрощения визуального сравнения.



**Рис. 3.** Сравнение длительных ритмограмм у пациента с COVID-19, зарегистрированных различными устройствами: *а* – Поли-Спектр-8; *б* – Zephyr

### Результаты

Авторами была выдвинута гипотеза о том, что используемый алгоритм детектирования QRS-комплексов, в том числе реализуемые в нем методы фильтрации, предобработки и постобработки, влияют на конечный сигнал ритмограммы, удаляя из неё спайковые эпизоды. Данная гипотеза согласуется со статистическим принципом применения методов вариабельности ритма сердца, где исследуется совокупность RR-интервалов, а не единичные события.

Для проверки данной гипотезы было проведено исследование различных известных и используемых в практике алгоритмов детектирования R-пиков на исходном ЭКГ-сигнале. Использовались алгоритмы из открытых источников [5, 6]:

- Pan-Tompkins;
- Hamilton;
- Two-Moving-Average.

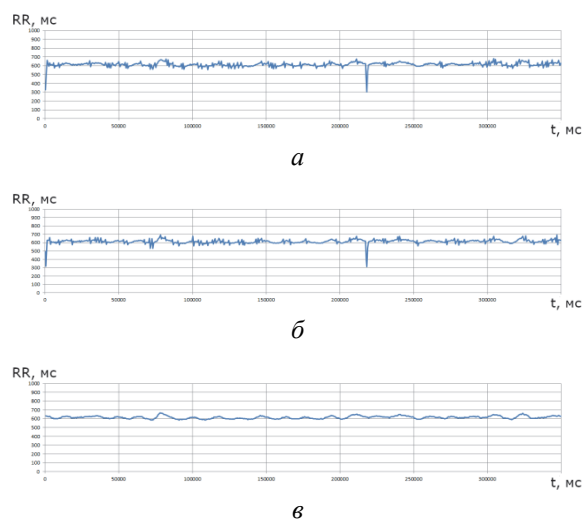
Результаты обработки ЭКГ пациента с COVID-19 в виде ритмограмм показаны на рис. 4.

В стандартном пакете Поли-Спектр-8 для расчета ритмограмм из ЭКГ применяется алгоритм Two-Average, обеспечивающий нормализацию сигнала и редукцию отклонений значений от среднего (рис. 4, *в*). Но если для расчета ритмограмм из того же ЭКГ применяются алгоритмы Pan-Tompkins и Hamilton, то в ритмограмме проявляются паттерны RR-интервалов (рис. 4, *а*, *б*), аналогичные кардиоспайкам ритмограмм от ZephyrSmart (см. рис. 2).

Полученные данные свидетельствуют, что кардиоспайки не являются результатом программно-аппаратных искажений сигнала, а имеют эндогенную природу и могут рассматриваться в качестве маркеров COVID-специфичных режимов регуляции ритма сердца.

### Заключение

Благодаря высокоточной кардиоинтвалографии на базе телеметрии ритма сердца в ритмо-



**Рис. 4.** Ритмограммы у пациента с COVID-19, полученные с помощью различных алгоритмов: *а* – Pan-Tompkins; *б* – Hamilton; *в* – Two-Average

граммах пациентов COVID-19 обнаружены специфические аномалии ритма – кардиоспайки. Верификация данных телеметрии на базе стандартного электрокардиографа указывает на инвариантность этого феномена к приборам регистрации и высокую значимость алгоритма детектирования RR-интервалов. Дано обоснование возможности рассматривать кардиоспайки в качестве эффективного маркера нарушений регуляторных процессов на разных фазах COVID-19.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание ННГУ им. Н.И. Лобачевского № 0729-2020-0062), а также грантов РФФИ № 18-413-520006, 19-013-00095.

### Литература

1. Poleyeva S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B. Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity // *Sovremennyye tehnologii v medicine*. 2019. V. 11, № 1. P. 109–115. URL: <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.13>.
2. Кузнецов А.А. Биофизика сердца. Методы обработки и анализа электрокардиографической информации при донозологических исследованиях : учеб. пособие. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2012. 237 с.
3. Ширшов Ю.А., Говорин А.И. Вегетативные расстройства у больных с гриппом А(Н1N1) // *Сибирский медицинский журнал*. 2011. № 5. С. 41–44.
4. Зуфаров А.А. Показатели вариабельности сердечного ритма при остром респираторном синдроме у детей // *Молодой ученый*. 2020. № 3 (293). С. 98–103. URL: <https://moluch.ru/archive/293/66153/>.
5. Nepi D., Sbrillini A., Agostinelli A., Maranesi E., Di Nardo F., Fioretti S., Pierleoni P., Pernini L., Valenti S., Burattini L. Validation of the Heart-Rate Signal Provided by the Zephyr BioHarness 3.0 // *Computing in Cardiology Conference*. 2016. V. 43; doi: 10.22489/CinC.2016.106-358.
6. Howell L., Porr B. ECG Detectors. DOI: 10.5281/zenodo.3353396.

# An experimental model for evaluating the effectiveness of the biofeedback method for optimizing the functional state in the problem of school maladjustment

S.A. Polevaya, O.Yu. Nekrich

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod

School maladjustment is understood as a complex of signs indicating that the social, psychological and psychophysiological state of the child does not meet the requirements of schooling [1, 15].

The problem of school maladjustment is an urgent socio-psychological problem in modern education and is a phenomenon that threatens society, since it serves as a source of serious problems, such as defective psychosocial functioning, the emergence of asocial behavior, an increase in suicidal risks, and the formation of addictions. As a result, there is an increase in juvenile delinquency, a decrease in interest in school education, an increase in the number of psychosomatic diseases, a noticeable decrease in the quality of labor resources, etc.

According to research data, from 35% [7] to 40% [18] primary school students face the problem of school maladjustment.

In modern literature, the problem of school maladjustment is often associated with various neuropsychiatric diseases, such as anxiety disorders, attention deficit hyperactivity disorder, organic brain disease and others, in which cognitive functions are affected (attention, memory, speech, thinking, perception).

The main modern methods of correction and prevention of school maladjustment include drug treatment, psychocorrectional techniques, cognitive training (including their computer versions).

One of the actively used and developed methods for correcting disorders in the functioning of body systems is adaptive control with biofeedback or biofeedback training [6, 20, 37, 40].

The biofeedback method is constantly actively developing, the library of biofeedback is being replenished – procedures for which an assessment is required for efficiency and safety. In connection with this fact, it is necessary to have models of such an assessment with a set of reliable and affordable tools [30, 36, 39].

The aim of the work is to search for markers of the effectiveness of the biofeedback method for optimizing adaptation processes and cognitive functions of children with the problem of school maladjustment. Objectification of adaptive processes and cognitive potential was provided thanks to heart rate telemetry and a cognitive trainer on the Web-platform “Cognitom” (cogni-nn.ru) [9, 10].

## Methods

The study involved 9-year-old children with school maladjustment with diagnoses of Attention Deficit Hyperactivity Disorder and Organic Brain Disease in the absence of signs of minimal cerebral dysfunction and somatic diseases at the time of partic-

ipation in the study. All children have persistent sympathicotonia. A total of 64 sessions were performed.

Sessions of biofeedback procedures were carried out using the “Rehacor” complex (manufactured by OOO NPKF “Medikom MTD”, Taganrog). Used “Beta/Theta-training” for the correction and treatment of various forms of impairment of attention, cognitive and motor functions.

For digital display of heart rate variability indices, the method of event-related heart rate telemetry (SSTRS) was used to assess the indices of autonomic regulation and functional state [34, 10].

The dynamics of indicators of cognitive functions was assessed using the method of assessing cognitive functions by indicators of sensorimotor activity on the Web-platform “Cognitom” [9, 10]. The study used tests of sensorimotor activity based on the classical method of measuring the sensorimotor response: the “Global Reading” test (stimuli are presented to the screen in the form of a sequence of words; the target stimulus is the word “mother”, upon the appearance of which it is necessary to press the button as soon as possible); test “Mirror letters” (letters are presented that can be depicted in the form of their mirror reflection; the target stimulus is letters written correctly); test “Counting” (demonstrates simple mathematical solved examples, the answers in which may be incorrect; target stimulus – correctly solved examples).

A computer color campimetry test was used, in which the subject is presented with a stimulus against a background of the same color. Then the subject, pressing the buttons, changes the color of the stimulus until he can distinguish which object or text was “hidden”. If the determination is successful, the inverse problem is solved.

Also, a computer version of the Stroop test was used. The test contains four contexts: Mono – the name of the color is written in black, according to which the subject makes a choice; Color – the color of the writing corresponds to the meaning, that is, if it is written “red”, the letters are red: trueText – the meaning of the word (color name) does not coincide with the color in which it is written, the choice should be made in accordance with the meaning of the word; trueColor – the meaning of the word (color name) does not coincide with the color in which it is written, the choice should be made in accordance with the color of the letters. As a result of the test, errors and response times are recorded when solving each problem.

At the beginning of the session, the child was tested on the Cognitom web platform: sensorimotor

activity test, computer color campimetry, Stroop test. Then the “Beta/Theta-training” procedure was carried out with EEG recording.

Throughout the session, continuous monitoring of the heart rate was carried out.

To process the data obtained, statistical methods were used: nonparametric tests (T-Wilcoxon test), ANOVA (Analysis of Variation), correlation analysis by Spearman’s method.

## Results

Evaluation of the effectiveness of biofeedback procedures based on indicators of the functional state of the brain, controlled in beta/theta-training, revealed a relationship between an increase in the beta rhythm index and a decrease in theta rhythm index with the repeat number. The data obtained indicate the optimization of the functional state of the brain and can be considered as a marker of an increase in the intensity of cognitive processes and concentration of attention.

During the course, “trace changes” of the parameter controlled in the procedure appear after the patient stops conscious efforts to control it, which indicates the formation of a new functional system with stable autoregulation.

Evaluation of the effectiveness of biofeedback procedures according to the indicators of event-related telemetry of the heart rate revealed that with the session number the level of the physiological norm increases and the likelihood of disruption of adaptation processes decreases (a decrease in the level of prenosological and premobid states according to M.R. Baevsky [2, 5]). For these effects, a logarithmic dependence was obtained, which confirms the relationship of changes with the course of biofeedback.

Thus, the course of biofeedback procedures influenced not only the level of brain activity, but also the level of autonomic regulation. There was a restructuring of the functional system that provides the function of attention, with the formation of stable self-regulation, an increase in adaptive capabilities, and the optimization of the functional state of the brain and the body as a whole.

Evaluation of the effectiveness of biofeedback procedures for indicators of cognitive functions.

Perception. Using the Computer Color Campimetry test, the maximum color discrimination thresholds were found in the green part of the spectrum for both detection and disappearance thresholds. This group is characterized by an optimal emotional state, a decrease in anxiety.

A relationship has been revealed between a decrease in the number of errors associated with going beyond the color spectrum with a repeat number. A linear relationship was obtained, which suggests that the decrease in errors is not accidental, that is, this group has the effect of learning, optimizing the color perception function.

Attention. In tests of sensorimotor activity for this group, the highest level of complexity of the task was revealed in tests with an arithmetic orientation. A decrease in the number of errors in the Mirror Letters

test may indicate an optimization of the spatial perception function.

Also, in tests with a verbal orientation, the number of errors decreases with the repetition number, which indicates the presence of a learning effect.

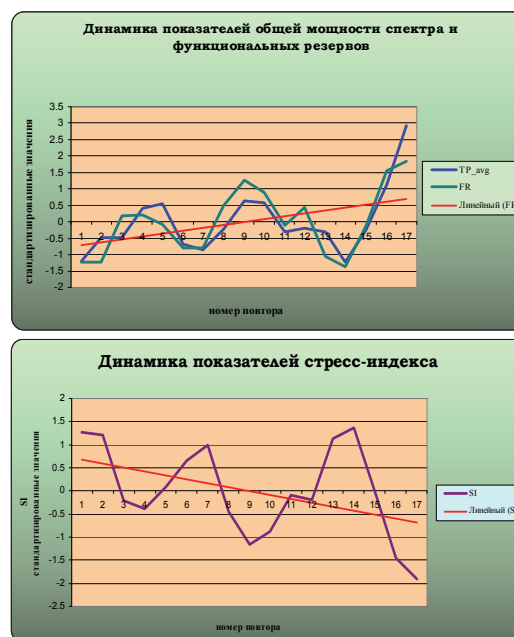
Selective attention, cognitive control. In the Stroop test, this group is characterized by the presence of the interference effect of verbal and sensory images in the absence of consolidation and competition effects in most of the effects of consolidation and competition in the color or meaning of the text (Fig. 1).



**Fig. 1.** The effect of interference and the peculiarities of the predominance of the type of image in the Stroop test in the group of children with the problem of school maladjustment ( $V > S$  – the predominance of the verbal image,  $S > V$  – the predominance of the color pattern,  $S = V$  – the absence of competition between images)

Changes in the physiological support of problem solving in the Stroop test were revealed.

Oscillatory dynamics of changes in the functional state manifested itself upon repetition of training. The oscillation period is 7 repetitions, the optimal functional state occurs at the fifth repetition and decreases to 7. When the periods are repeated, the optimization is enhanced. The positive effect is growing (Fig. 2).



**Fig. 2.** Oscillatory dynamics of changes in the functional state during the course of biofeedback procedures



A strong relationship was found between a decrease in stress and an increase in functional reserves (Fig. 3).

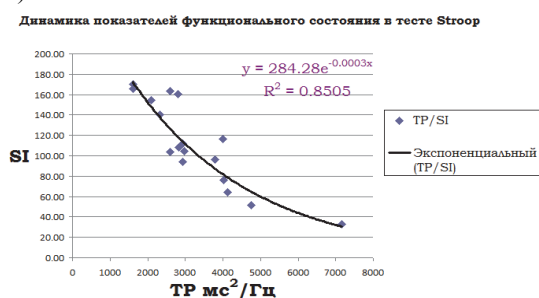


Fig. 3. Dynamics of stress indicators and functional reserves during the course of biofeedback procedures

### Conclusion

In connection with the active development of the biofeedback method and the constant replenishment of the library of procedures, it is necessary to evaluate them for efficiency and safety.

Reliable and accessible tools for assessing the effectiveness of biofeedback procedures are the Method of Event-Linked Heart Rate Telemetry (CSTRS) for assessing the indicators of autonomic regulation and functional state and the Method for assessing cognitive functions by indicators of sensorimotor activity on the Web-platform “Cognitom”.

The effectiveness of biofeedback procedures for cognitive functions is manifested in the optimization of the functions of color and spatial perception, selective attention and cognitive control.

The effectiveness of biofeedback procedures for the functional state was manifested in a decrease in the level of anxiety, tension of regulatory systems and an increase in functional reserves, adaptive potential and the contribution of the central circuit of regulation to the provision of activities.

### Literature

1. Adler A. Practice and theory of individual psychology; [per. from English A. Bokovikova]. Moscow: Acad. project, 2007. P. 176.
2. Baevsky R.M., Ivanov G.G., Chireikin L.V., Gavrilushkin A.P., Dvoryaninova V.V., Dovgalevsky P.Ya., Kukushkin Yu.A., Mironova T.F., Prilutsky D.A., Semenov Yu. N., Fedorov V.F., Fleishman A.N., Medvedev M.M. Analysis of heart rate variability using various electrocardiographic systems (guidelines) // Arrhythmology Bulletin. 2002. № 24. P. 65–88.
3. Baevsky R.M. Assessment of the level of health in the study of practically healthy people / R.M. Baevsky, A.P. Berseneva, E.S. Luchitskaya, I.N. Slepchenkova, A.G. Chernikov. M.: Slovo, 2009. 100 p.
4. Possibilities of biofeedback in the management of the functional state: Educational and methodological recommendations / GOU VPO “Pomor State University named after M.V. Lomonosov”. 2009. 21 p.
5. Gasanov R.F., Makarov I.V., Emelina D.A. Biochemical markers of anxiety states in children with hyperkinetic disorder // Social and Clinical Psychiatry. 2020. № 1. P. 67–72.
6. Ivanovsky Yu.V., Smetankin A.A. Principles of using the biofeedback method in the system of medical rehabilitation // Biol. Feedback. 2000. P. 2–9.

7. Katunova V.V., Balandina O.V., Bozhkova E.D., Dvoryaninova V.V. Results of the screening stage of the project to identify the syndrome of school deadaptation “Healthy future” // Modern problems of health care and medical statistics. 2019. V. S5. P. 81–82.

8. Nosovskiy A.M., Pozdnyakov S.V., Kaminskaya E.V. Mathematical methods for assessing heart rate variability. (Overview) // Norwegian journal of development of the international science. 2018. № 16(1). P. 22–39.

9. Poleyeva S.A., Tsirkova M.M., Telnykh N.A. Digital psychophysiological mapping: search for markers of attention deficit hyperactivity disorder in children // Nonlinear dynamics in cognitive research. 2019. V. 2019. P. 149–151.

10. Poleyeva S.A., Bulanov N.A., Parin S.B. Computer technologies for screening, diagnostics and digital display of cognitive impairments // XXI International scientific and technical conference “Neuroinformatics-2019”. 2019. P. 125–132.

11. Poleyeva S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B. Event-related telemetry of the heart rate for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress in conditions of natural activity // Sovrem. technol. honey. 2019. № 1. P. 109–155.

12. Software and methodological support of functional biocontrol with biological feedback “REACOR”: User manual. 2012. 192 p.

13. Runova E.V., Grigorieva V.N., Bakhchina A.V., Parin S.B., Shishalov I.S., Kozhevnikov V.V., Nekrasova M.M., Karatushina D.I., Grigorieva K.A., Poleyeva S.A. Vegetative correlates of arbitrary representations of emotional stress // Sovrem. technol. honey. 2013. № 4.

14. Skok A.B., Filatova O.V., Shtark M.B., Shubina O.A. Biofeedback in neuropsychiatric practice // Bulletin of the Siberian Branch of the Russian Academy of Medical Sciences. 1999. № 1. V. 91. P. 30–35.

15. Slipchenko E.S., Frantseva E.N. Causes of school maladjustment in primary school age // Category “social” in modern pedagogy and psychology. 2020. P. 172–176.

16. Soroko S.I., Nikolaev I.V. The use of adaptive biocontrol technology to correct the syndrome of hyperactive disorder with attention deficit in children // Bulletin of Education and Science Development of the Russian Academy of Natural Sciences. 2019. № 1. P. 82–93.

17. Stankevich L.A. Interfaces “brain–computer”: development and application // Remote Educational Technologies. 2020. P. 271–274.

18. Chutko L.S. Clinical manifestations of school maladjustment / L.S. Chutko, S.Yu. Surushkina, T.I. Anisimova // Practice of a pediatrician. 2015. № 3. P. 48–52.

19. Shtark M.B., Skok A.B. Application of electroencephalographic biofeedback in clinical practice (literature review) // Biofeedback–3: Theory and practice: collective monograph / otv. ed. M.B. Stark, R. Call. Novosibirsk: Tsaris, 1998. P. 130–141.

20. Alan N., Eller L., Bates M.E., Carmody D.P. Current evidence on heart rate variability biofeedback as complementary anticraving intervention // J. Altern. Complement. Med. 2018. V. 24, № 11. P. 039.

21. Gorman A.J., Willmott A.P., Mullineaux D.R. The effects of concurrent biomechanical biofeedback on novel skill acquisition // Sports Biomechanics. 2019; doi: 10.1080/14763141.2019.1650101.

22. Barth B., Mayer K., Strehl U., Fallgatter A.J., Ehlis A.C. EMG biofeedback training in adult attention-deficit/hyperactivity disorder: An active (control) training? // Behavioural brain research. 2017. V. 329. P. 58–66.

23. Blum J., Rockstroh C., Göritz A.S. Heart rate variability biofeedback based on slow-paced breathing with immersive virtual reality nature scenery // Frontiers in Psychology. 2019. V. 10. P. 2172.

24. Coben R., Linden M., Myers T.E. Neurofeedback for Autistic Spectrum Disorder: A Review of the Literature // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2010. V. 35, № 1. P. 83–105.
25. Coben R., Myers T.E. The Relative Efficacy of Connectivity Guided and Symptom Based EEG Biofeedback for Autistic Disorders // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2010. V. 35, № 1. P. 13–23.
26. Drechsler R. Ist Neurofeedbacktraining eine wirksame Therapiemethode zur Behandlung von ADHS? Ein Überblick über aktuelle Befunde // *Z. Neuropsychol.* 2011. V. 22, № 2. P. 131–146.
27. Edward F., Pace-Schott E.F., Amole M.C., Aue T., Balconi M., Bylsma L.M., Critchley H., Van Elzakker M.B. Neuroscience and Biobehavioral Reviews. Elsevier, 2019. V. 103. P. 267–304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.05.002>.
28. Geanini-Yagüez A., Fernández-Cuadros M.E., Nieto-Blasco J., Ciprián-Nieto D., Oliveros-Escudero B., Lorenzo-Gómez M.F. EMG–biofeedback en el tratamiento de la incontinencia urinaria y calidad de vida // *Rehabilitación*. 2019. V. 48, № 1. P. 17–24.
29. Hoogman M., Bralten J., Hibar D.P., Mennes M., Zwiers M.P., van Hulzen KJE et al. Subcortical brain volume differences in participants with attention deficit hyperactivity disorder in children and adults: a cross-sectional mega-analysis // *Lancet Psychiatry*. 2017. V. 4. P. 310–19.
30. Lovato N., Lack L. Insomnia and mortality: A meta-analysis // *Sleep Med. Rev.* 2019. V. 43. P. 71–83; doi: 10.1016/j.smr.2018.10.004.
31. Lubar J.F., Shouse M.N. EEG and Behavioral Changes in a Hyperkinetic Child Concurrent with Training of the Sensorimotor Rhythm (SMR): A Preliminary Report // *Biofeedback Self Regul.* 1976. V. 1, № 3. P. 293–306.
32. Melo D.L.M., Carvalho L.B.C., Prado L.B.F. et al. Biofeedback Therapies for Chronic Insomnia: A Systematic Review // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2019. V. 44. P. 259–269. URL: <https://doi.org/10.1007/s10484-019-09442-2>.
33. Minkyu, Ahn et al. A Review of Brain–Computer Interface Games and an Opinion. Survey from Researchers, Developers and Users // *Sensors*. 2014. V. 14. P. 14601–14633; doi:10.3390/s140814601.
34. Paul M., Sandhu J.S. Biofeedback approach in the treatment of generalized anxiety disorder // *Iran. J. Psychiatry*. 2007. V. 2(3). P. 90–95.
35. Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B. Event-related telemetry of heart rate for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity // *CTM*. 2019. V. 11(1). P. 109–114.
36. Ren R., Covassin N., Zhang Y., Lei F., Yang L., Zhou J. Interaction Between Slow Wave Sleep and Obstructive Sleep Apnea in Prevalent Hypertension // *Hypertension*. 2020. V. 75. P. 516–523.
37. Taghizadeh N., Eslaminejad A., Raoufy M.R. Protective effect of heart rate variability biofeedback on stress-induced lung function impairment in asthma // *Respir. Physiol. Neurobiol.* 2019. V. 262. P. 49.
38. Tsutsui S., Tsuboi K., Nakagawa Y. Biofeedback therapy in chronic headaches – prognostic investigation // *Current Biofeedback Research in Japan*. 1993. P. 97–102.
39. Weiss F., Zamoscik V., Schmidt S.N., Halli P., Kirsch P., Gerchen M.F. Heart rate variability biofeedback therapy and graded exercise training in management of chronic fatigue syndrome: an exploratory pilot study // *Journal of Psychosomatic Research*. 2017. V. 93. P. 6–13.
40. Zaccaro A., Piarulli A., Laurino M. et al. How breathcontrol can change your life: a systematic review on psycho-physiological correlates of slow breathing // *Front. Hum. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 353.

# Цифровое отображение особенностей когнитивных процессов у пациентов в клинической фазе COVID-19

С.А. Полевая<sup>1</sup>, М.М. Циркова<sup>1,2</sup>, Е.А. Мухина<sup>1</sup>, Е.В. Еремин<sup>1</sup>, Н.А. Буланов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Приволжский окружной медицинский центр, Нижний Новгород

<sup>3</sup>Высшая школа экономики, г. Москва

## Введение

Пандемия COVID-19 актуализировала комплекс патологических состояний, связанных с рисками нарушения когнитивных функций: тяжелый острый респираторный синдром (ТОРС), хронический стресс, мультисистемный воспалительный синдром, синдром диссеминированного внутрисосудистого свертывания крови [1]. У значительной части пациентов с COVID-19 наблюдается чрезвычайно низкая сатурация крови кислородом, но непропорционально мало симптомов церебральной, или «счастливой», гипоксии. Кислородное голодание головного мозга может провоцировать неврологические нарушения, особенно в областях мозга, очень чувствительных к гипоксии. Когнитивной дисфункции способствуют ишемические или гипоксические поражения гиппокампа, базальных ганглиев, мозжечка, нарушения функциональных связей, типичные для ТОРС. Специфические изменения когнитивных процессов могут быть связаны со специфическими нейротропными проявлениями активности короновирусов [2]. Свойства SARS-CoV-2 как катализатора и ускорителя агрегации белков головного мозга способствуют серьезным повреждениям структуры и функции центральной нервной системы (ЦНС), включая инфекции иммунных макрофагов, микроглии или астроцитов, тяжелый энцефалит, токсическую энцефалопатию и тяжелые острые демиелинизирующие поражения. Данные ФМРТ свидетельствуют, что очаги деструкции распространяются на комплекс подкорковых структур, захватывают таламус, базальные ганглии и зоны неокортекса, включенные в лимбическую систему. Нейроанатомическая схема поражений мозга хорошо согласуется с нейроархитектурой дофаминергических путей. Не случайно одним из проявлений действия SARS-CoV-2 является снижение активности дофамина в нигростриатном комплексе [3]. Механизмы ретроградного или антероградного нейронального транспорта обеспечивают миграцию вирусов в моторные и сенсорные терминалы, что может провоцировать существенные искажения сенсомоторных реакций любого уровня сложности. Таким образом, SARS-CoV-2 поражает основные компоненты нейрональной платформы, поддерживающей ключевые когнитивные процессы:

1) повреждение экстероцептивных и интероцептивных сенсорных каналов провоцирует нарушение перцептивных процессов отображения объективных сигналов в признаки субъективных

информационных образов и сигналы обратной афферентации;

2) деструкция таламуса провоцирует нарушение процесса концентрации информационных ресурсов на наиболее значимых объектах и событиях, то есть селективного внимания;

3) гипоксические поражения гиппокампа провоцируют нарушения в динамической системе памяти и искажения в процессах сохранения и воспроизведения информационных образов;

4) дегградация дофаминергической системы искажает оценочные функции, нарушает локомоторные процессы, провоцирует редукцию эмоций, в том числе витальных, таких как «боль».

Из сообщений пациентов известен перечень когнитивных проблем, связанных с COVID-19: спутанное сознание, трудности с концентрацией внимания, редукция двигательной активности, нарушение координации движений, потеря запаха и вкуса, снижение висцеральной чувствительности, резкая редукция оценочных функций и мотиваций [4]. Около 70 % пациентов после выписки из больницы имели когнитивный дефицит, который проявлялся в уменьшении скорости и точности когнитивных процессов на фоне депрессии и тревожных расстройств. Данные о скорости и точности когнитивных процессов у пациентов в клинической опасной фазе COVID-19 крайне малочисленны. Уникальные возможности для объективизации открываются благодаря применению дистанционных методов мониторинга на базе Web-платформ с набором интерактивных сенсомоторных тестов. В нашей работе представлены результаты измерения когнитивных функций на базе Web-платформы КОГНИТОМ [5] и определены особенности работы с информационными образами у пациентов в клинической фазе болезни.

## Методы

**Дизайн исследования и характеристика участников.** В исследовании изучалось состояние когнитивной сферы пациентов, которые были госпитализированы с диагнозом COVID-19. Проводилось оно на базе Приволжского окружного медицинского центра, где пациенты находились на лечении, а временные рамки исследования охватывали период с ноября 2020 по февраль 2021 года. Выборка составила 12 пациентов (группа COVID) возраста от 40 до 63 лет, все они имели пневмонию разной степени тяжести и сатурацию ниже 95. Исключались пациенты с неврологическими и психиатрическими заболеваниями.

Диагноз COVID-19 был поставлен с помощью положительного теста полимеразной цепной реакции (ПЦР) на SARS-CoV-2 из верхних дыхательных путей. Исследование проходило непосредственно в период острой формы заболевания, но участвовали только те пациенты, чья температура не превышала 37° и чье состояние субъективно оценивалось как оптимальное и вполне допускающее решение обыденных задач. Этот критерий отбора использовался для исключения искажения реальной картины влияния COVID-19 на когнитивные функции. Помимо группы пациентов, в исследовании принимала участие контрольная группа здоровых людей (КОНТРОЛЬ), в которую вошли 18 человек от 40 до 54 лет, не имеющих диагноза COVID-19. Затем по полученным результатам у двух групп проводилось сравнение.

Когнитивные функции испытуемых изучались при помощи трех тестов: тест простой сенсомоторной реакции, тест на память «7 слов» и модификация теста Stroop. Все они были представлены на Web-платформе КОГНИТОМ (cogni-nn.ru) [5], что позволило провести объективную диагностику с мгновенной обратной связью и минимизировать участие эксперта-посредника. Измерялись показатели скорости и точности сенсомоторной активности:

- 1) временной интервал между появлением изображения на экране монитора и моментом нажатия на кнопку (CogR, миллисекунды);
- 2) продолжительность удержания кнопки при моторной реакции (MR, миллисекунды);
- 3) количество пропусков целевого стимула (Err1);
- 4) количество двойных нажатий (Err2);
- 5) количество нажатий на нецелевой стимул.

В тесте «Простая сенсомоторная реакция» (ПСМР) предъявлялось последовательно 7 одинаковых стимулов (красный круг диаметром 5 см), межстимульный интервал 1000 мс, экспозиция 100 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только на экране появится изображение круга. Продолжительность теста не более 2 мин.

В тесте «7 слов» (ПАМЯТЬ) предлагалось запомнить 7 слов: лицо, красный, церковь, бархат, фиалка, кошка, время. Последовательно предъявлялось 58 слов, из которых 19 являлись целевыми. Межстимульный интервал 2000 мс, экспозиция 500 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только на экране появится запомненное слово. Продолжительность теста не более 3 мин.

В модифицированном тесте Stroop (Stroop\_smr) стимулами являлись цветные изображения слов, обозначающих цвет: красный, зеленый, синий, желтый, черный. Цвет букв назначался из этого же набора вариантов. Межстимульный интервал 1000 мс, экспозиция 500 мс. Задание: нажимать на кнопку сразу, как только цвет букв соответствует смыслу слова. Всего последовательно предъявлялось 99 стимулов, из которых 20 являлись целевыми. Продолжительность теста не более 2 мин. Общая продолжительность тестирования составляла не более 10 минут.

**Статистический анализ** проводился с использованием программы Statistica 10. Применены U-критерий Манна – Уитни и критерий Вилкоксона для оценки различий между двумя группами, многофакторный ANOVA, критерий корреляции Спирмена и кластерный анализ *k*-means. Статистическая значимость для всех анализов была установлена на уровне  $p < 0,05$ .

## Результаты и обсуждение

Цифровое отображение когнитивных процессов определено в пространстве 15 параметров скорости и точности простой и сложной сенсомоторной активности (СМА). Для 3 вариантов СМА на Web-платформе КОГНИТОМ были сформированы интерактивные контексты (тесты), включающие универсальный моторный компонент (нажатие на клавишу) и разные когнитивные компоненты. Когнитивные компоненты отличались сложностью правил принятия решений и когнитивными процессами, обеспечивающими успешные реакции. Когнитивный компонент каждого теста включал сохранение в рабочей памяти целевых признаков и образа действия, перцепцию, селективное внимание, принятие решения и запуск программы действий. Тест «Простая сенсомоторная реакция» обеспечивал минимальный уровень когнитивной нагрузки: для успеха достаточно выделить один признак – наличие/отсутствие сенсорного события. Тест «7 слов» сложнее: необходимо сохранить в памяти 7 хорошо знакомых слов (вербальных образов) и контролировать наличие/отсутствие целевого образа на экране монитора. Модифицированный тест Stroop отличался количеством целевых признаков и сложностью операций с информационными образами: необходимо обнаружить сенсорное событие (появление на экране слова, обозначающего цвет), определить соответствие вербального (смысл слова) и сенсорного образа (цвет букв на изображении слова), контролировать идентичность этих образов.

Анализ цифровых отображений когнитивных процессов позволил выявить сложный паттерн искажений, спровоцированных инфекцией вирусом SARS-CoV-2 (табл. 1).

Таблица 1. Параметры сенсомоторной активности

Параметры	Группа "COVID"	Группа "КОНТРОЛЬ"	Mann-Whitney U Test, p-value
CogR_ПСМР	393,83 ± 40,93	225,06 ± 27,38	0,002
Err#1_ПСМР	4,33 ± 1,65	1,94 ± 0,42	0,504
Err#2_ПСМР	0,58 ± 0,23	2,61 ± 0,63	0,035
Err#3_ПСМР	0,42 ± 0,15	0,61 ± 0,12	0,315
CogR_ПАМЯТЬ	786,42 ± 22,81	563,56 ± 31,15	0,000
Err#1_память	2,25 ± 0,52	0,56 ± 0,17	0,007
Err#2_память	0,08 ± 0,08	0,00 ± 0,00	0,247
Err#3_память	1,08 ± 0,23	3,28 ± 0,50	0,002
CogR_Stroop	735,83 ± 21,78	619,89 ± 9,97	0,000
Err#1_Stroop	6,83 ± 1,53	2,39 ± 0,45	0,013
Err#2_Stroop	0,17 ± 0,11	0,11 ± 0,08	0,693
Err#3_Stroop	2,75 ± 0,52	4,22 ± 0,39	0,036

Для оценки влияния гипоксии на когнитивные процессы проведен анализ связи параметров сенсомоторной активности с уровнем сатурации. Из



15 параметров цифрового отображения наиболее чувствительны к гипоксии 2: чем ниже насыщение крови кислородом, тем продолжительнее удерживание кнопки (MR) в тесте «Простая сенсомоторная реакция» (критерий Спирмана  $r = -0,71$ ) и продолжительность когнитивного процесса (CogR\_ПАМЯТЬ) в тесте «7 слов» (критерий Спирмана  $r = -0,78$ ). Связь сатурации с этими параметрами аппроксимируется линейными функциями, позволяющими рассчитывать риски гипоксических нарушений ЦНС по результатам компьютерного тестирования (рис. 1).

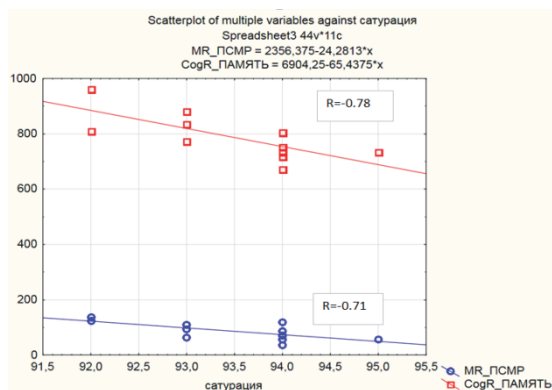


Рис. 1. Влияние насыщения крови кислородом на когнитивные процессы

Нарушение структуры и функций нейронных сетей закономерно проявилось в увеличении продолжительности когнитивного компонента сенсомоторной активности как в простых, так и в сложных контекстах. Общим этапом решения задач разного уровня сложности является процесс перцепции. Очевидно, что преобразование зрительного сигнала в субъективный информационный образ существенно замедляется из-за связанной с заболеванием COVID-19 деградацией рецепторов, демиелинизацией нервных волокон и деструкцией таламуса (рис. 2).

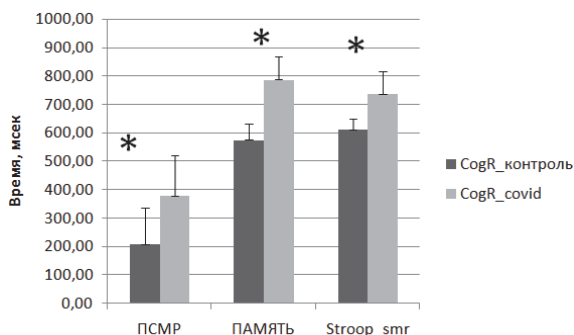


Рис. 2. Продолжительность когнитивного компонента сенсомоторной активности в группах «COVID» и «КОНТРОЛЬ». Звездочкой обозначены достоверные различия при  $p < 0,05$

Значимые эффекты, связанные с фактором «ГРУППА: КОНТРОЛЬ vs. COVID», выявлены в точности когнитивных процессов (ANOVA,  $F(4,112) = 3,9276$ ,  $p = 0,00506$ ) (рис. 3). При заболевании COVID-19 из 9 показателей точности

достоверные различия (анализ post hoc по тесту Бонферрони,  $p = 0,0005$ ) проявились только в росте количества пропусков целевых событий в тесте Stroop.

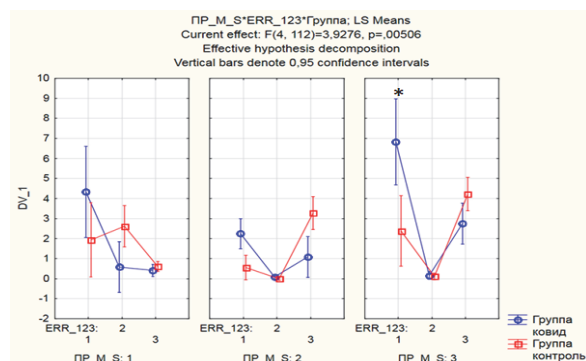


Рис. 3. Сравнительная оценка точности когнитивных процессов при заболевании COVID-19. Звездочкой обозначены достоверные различия  $p < 0,05$

Принятие правильного решения по результату сравнения вербального и сенсорного образов требует значительных ресурсов рабочей памяти и обеспечивается обменом данными в цикле гиппокамп – базальные ганглии – таламус. Кроме того, для успешной компарации необходима активность дофаминергической системы. Таким образом, в работу вовлекаются элементы нейрональной платформы, поврежденные вирусом SARS-CoV-2, что неминуемо приводит к существенным искажениям когнитивных процессов.

Сравнительный анализ сенсомоторной активности в группах «COVID» и «КОНТРОЛЬ» позволил выделить 4 наиболее информативных параметра: продолжительность когнитивного компонента в каждом из тестов и количество пропусков события в тесте Stroop. На основе этих параметров проведен кластерный анализ и определены диапазоны показателей, характеризующие специфические искажения когнитивных процессов у пациентов в клинической фазе COVID-19 (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика кластеров по параметрам когнитивных процессов

Параметры	cluster 1 (КОНТРОЛЬ)	cluster 2 (COVID)
CogR_ПСМР	171,78 - 272,22	345,06 - 522,34
CogR_ПАМЯТЬ	520,93 - 655,07	713,91 - 850,29
CogR_Stroop	606,24 - 659,66	673,82 - 791,98
Err#1_Stroop	1,35 - 2,75	5,02 - 11,78
Чувствительность	0,94	0,75
Специфичность	0,85	0,90

Таким образом, цифровое отображение когнитивных процессов, полученное с помощью комплекса интерактивных тестов на Web-платформе КОГНИТОМ, позволило формализовать специфику когнитивных искажений у пациентов в клинической фазе COVID-19. Полученные данные могут быть использованы для создания и оценки эффективности персонализированных программ клинической поддержки и реабилитации.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (государственное задание ННГУ им. Н.И. Лобачевского № 0729-2020-0062), а также грантов РФФИ № 18-413-520006, 19-013-00095.

### Литература

1. *Miskowiak K.W., Johnsen S., Sattler S.M., Nielsen S., Kunalan K., Rungby J., Lapperre T., Porsberg C.M.* Cognitive impairments four months after COVID-19 hospital discharge: Pattern, severity and association with illness variables // *European Neuropsychopharmacology*. 2021. V. 46. P. 39–48. URL: <https://doi.org/10.1016/j.euroneuro.2021.03.019>.
2. *Beaud V., Crottaz-Herbette S., Dunet V.* Pattern of cognitive deficits in severe COVID-19 // *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 2021. V. 92. P. 567–568; doi:10.1136/jnnp-2020-325173.
3. *Mukaetova-Ladinska E.B., Kronenberg G., Raha-Chowdhury R.* COVID-19 and neurocognitive disorders // *Curr. Opin. Psychiatry*. 2021. V. 34. P. 149–156; doi:10.1097/YCO.0000000000000687.
4. *Devita M., Bordignon A., Sergi G., Coin A.* The psychological and cognitive impact of Covid 19 on individuals with neurocognitive impairments: research topics and remote intervention proposals // *Aging Clinical and Experimental Research*. 2021. V. 33. P. 733–736. URL: <https://doi.org/10.1007/s40520-020-01637-6>.
5. *Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B.* Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity // *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2019. V. 11, № 1. P. 109–115. URL: <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.13>.

# Объективные характеристики когнитивных ВП и их использование в задачах поиска классификации и поиска маркеров у пациентов с различными типами головной боли

М.А. Попова<sup>1,2</sup>, А.О. Сельский<sup>1,2</sup>, Р.Р. Парсамян<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
email: selskiiao@gmail.com

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского; email: anefila@gmail.com

Исследование мозга человека является одной из важнейших задач современной науки. Электроэнцефалограммы часто используются для этой цели, так как этот метод прост в использовании, неинвазивный и недорогостоящий по сравнению с другими. При этом пространственного и временного разрешения ЭЭГ хватает для многих задач, связанных с изучением когнитивных функций мозга [1]. После получения записи ЭЭГ-данных их необходимо обработать с помощью одного из численных методов, число которых в настоящий момент весьма велико [2, 3]. Одним из перспективных методов анализа записей ЭЭГ является построение вызванных потенциалов [2, 4]. Данный метод часто применяется для анализа ЭЭГ данных экспериментов, в ходе которых испытуемый выполняет повторяющиеся задачи, требующие внимания или когнитивной деятельности. Помимо фундаментального исследования когнитивных механизмов человеческого мозга, вызванные потенциалы перспективны при создании систем «мозг – компьютер», применяемых для обучения или реабилитации пациентов с различными заболеваниями. Исследование вызванных потенциалов, как правило, сводится к исследованию их отдельных компонентов (экстремумов). Так, когнитивные вызванные потенциалы, как известно, отличаются наличием хорошо выраженного компонента P(300) [5]. При этом у каждого компонента вызванного потенциала можно выделить характерное для него время и значение. Известны исследования, в которых находится средняя по большому числу испытуемых латентность конкретного компонента вызванного потенциала, например для P(300) она в разных исследованиях составляет 300–350 мс [6].

Ручная разметка компонент вызванных потенциалов требует больших затрат времени, так как в некоторых экспериментах число испытуемых достигает десятков и сотен человек, при том что необходимо разметить отдельно каждый канал ЭЭГ-данных, которых тоже часто от 10 до 30. Таким образом, весьма важной задачей оказывается автоматическое нахождение компонент вызванных потенциалов и их характерных времен. Помимо этого, необходимо часто проводить статистическую оценку амплитуды и времени отдельных компонент или их совокупности. Мы предлагаем метод расчета характеристики, определяющей соответствие заданным параметрам выделенного вызванного потенциала по автоматически выделенным компонентам. То есть предлагается оценить, насколько латентность времен компонент

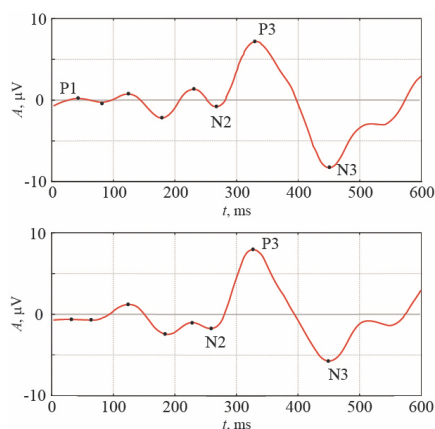
вызванного потенциала близка к средней по большому числу испытуемых. Предлагаемый метод легко адаптировать под интересующие компоненты, дизайн эксперимента и ожидаемые результаты. Так, для примера в настоящей статье показана настройка метода для выделения когнитивных вызванных потенциалов. Для них основное внимание уделяется компоненту P(300).

Общая методика нахождения вызванных потенциалов хорошо известна [4]. В случае если испытуемому предъявляют серию стимулов, то за каждым стимулом следует ответная реакция на стимул в ЭЭГ-канале. Из-за изменчивости сигнала вызванный потенциал по одному стимулу дает мало информации, поэтому вызванные потенциалы для идентичных стимулов усредняются. Для этого важно знать окончание предъявления стимулов, иначе усреднение даст смещенную картину. Если расчет вызванных потенциалов выполнен верно, то после предъявления стимула наблюдается серия экстремумов (называемых компонентами вызванного потенциала), тогда как случайные составляющие ЭЭГ-сигнала, не имеющие отношения к ответу на данный стимул, после усреднений близки к нулю. Для разных стимулов вызванные потенциалы имеют разную форму. На рисунке 1 продемонстрировано несколько когнитивных вызванных потенциалов для одного из испытуемых, построенные по паре каналов.

Хорошо видно, что для данных вызванных потенциалов очень четко выделяются компоненты N2, P3, N3, тогда как другие компоненты менее выражены. Такое распределение очень характерно для когнитивных вызванных потенциалов. Выделить с помощью программных средств экстремумы на вызванном потенциале – тривиальная задача. Однако сложности начинаются при выделении отдельных компонент вызванного потенциала. Эту задачу можно решить с использованием информации о средних латентностях определенных компонент (то есть среднем времени, при котором эта компонента наблюдается у большой группы людей – более сотни испытуемых) [7].

В зависимости от типа вызванного потенциала, возраста испытуемых, особенностей дизайна эксперимента латентность компонент может быть разной.

Для когнитивного вызванного потенциала была составлена таблица с средней латентностью и стандартным отклонением для основных компонент по обзору нескольких статей, в которых по большому числу испытуемых были рассчитаны средняя латентность и стандартное отклонение.

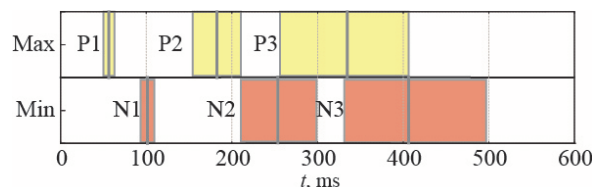


**Рис. 1.** Примеры вызванных потенциалов для двух каналов одного из испытуемых. Точками нанесены экстремумы вызванного потенциала. Обозначены выделенные вручную компоненты

Компонент	Средняя латентность (мс)	Стандартное отклонение (мс)
P1	58	6
N1	100	9
P2	179	26
N2	258	36
P3	336	73
N3	405	87

На основе этой таблицы была разработана программа автоматического выделения компонент вызванного потенциала. Первым этапом является разметка экстремумов вызванного потенциала (обозначены точками на рисунке 1). Далее необходимо выделить, какие из экстремумов являются компонентами вызванного потенциала в соответствии с таблицей латентности. Автоматизация метода выделения компонент требовала особого подхода к разметке, в связи с этим были выделены области отдельно для максимумов и отдельно для минимумов (смотрите разметку цветом на рисунке 2: красным для минимумов, желтым для максимумов). Если экстремум с учетом знака второй производной попадает в заданный интервал, то он отмечается как одна из компонент вызванного потенциала. Если экстремум наблюдается вне границ, то он игнорируется. Стоит отметить, что границы для некоторых экстремумов пересекаются, однако границы для минимумов не пересекаются, как и границы для максимумов. Такая разметка уступает в точности и корректности разметке, осуществляемой специалистом, однако она позволяет за секунды разметить данные, которые обычно размечаются в течение длительного времени, порой недель и месяцев. При этом предложенный метод прост в реализации и не требует больших вычислительных мощностей.

Помимо этого, хочется выделить возможность легкого перестроения метода. В зависимости от характера вызванного потенциала и дизайна эксперимента можно изменить таблицу и настройку границ компонент в ней так, чтобы обеспечить наилучший уровень выделения значимых компонент выделенного потенциала. Если одновременно с латентностью отмечать амплитуды экстремумов, можно быстро и довольно эффективно выделить основные характеристики вызванных потенциалов



**Рис. 2.** Схема выделения и оценки компонент вызванного потенциала по их попаданию в латентность

для большого объема экспериментальных данных. Для этого введем специальный параметр, зависящий от амплитуд соседних компонент и их близости к средней латентности:

$$\varepsilon = \sum M_i \cdot g_i \cdot \Delta \check{N}_i / (50 \cdot |N_i - \check{N}_i|),$$

$$M_i = |A_i - A_{i-1}| + |A_i - A_{i+1}|.$$

Здесь  $M_i$  – магнитуа данного экстремума, зависящая от значений данного и соседних экстремумов (если соседние экстремумы не определены, то их амплитуда определяется как  $A_0 = 0$ );  $g_i$  – коэффициент важности данной компоненты, подбираемый для конкретной задачи и дизайна эксперимента;  $N_i$  – время данного экстремума;  $\check{N}_i$  – время данной компоненты, взятое из среднего по большому числу испытуемых;  $\Delta \check{N}_i$  – ширина выделенной области по времени для данной компоненты. Если латентность выделенного максимума совпадает со средней, то  $|N_i - \check{N}_i|$  принимается равным 1, давая предел для максимального параметра  $\varepsilon$  при данной магнитуа и коэффициенте важности данной компоненты. Данный параметр несет много информации одновременно о всех компонентах вызванного потенциала и позволяет определить, насколько он хорошо удовлетворяет наперед заданному виду вызванного потенциала, типичного для данного эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 20-02-00752).

## Литература

1. Cooper N.R., et al. Investigating evoked and induced electroencephalogram activity in task-related alpha power increases during an internally directed attention task // Neuro Report. 2006. V. 17. P. 205–208.
2. Maksimenko V.A., et al. Human personality reflects spatio-temporal and time-frequency eeg structure // PloS one. 2018. V. 13, № 9. P. e0197642.
3. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A., et al. Wavelets in Neuroscience. Heidelberg, N. Y.: Springer, 2015. (Springer Series in Synergetics).
4. Schack B., Klimesch W. Frequency characteristic of evoked and oscillatory electroencephalographic activity in a human memory scanning task // Neurosci. Lett. 2002. V. 331. P. 107–110.
5. Levichkina E.V., Kaplan A.Ya. Unconscious Context Control of Visual Perception of Simple Stimuli: A Study Using Evoked Potentials // Human Physiology. 2009. V. 35, № 2. P. 74.
6. Klochkova O., Gnezditky V. Cognitive Evoked Potentials (P300): Is the Decision To Press a Button Always Conscious? // KnE Life Science. 2018. V. 4, № 8. P. 481–494.
7. Bruno R.S., et al. Long latency auditory evoked potential: differences in count form of rare stimulus // Revista CEFAC. 2016. V. 18, № 1. P. 14–26.

# Вклад периферических гормонов в функционирование когнитивной системы

А.Л. Проскура, С.О. Вечкапова, А.С. Ратушняк

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск  
email: annleop@mail.ru

## Введение

Когнитивная система (от лат. *cognitio* «познание») в своей основе содержит взаимодействие мышления, сознания, памяти. Ее структурно-функциональный базис в мозге определяется связями в синаптических сетях нейронов, которые основаны на молекулярных перестройках внутриклеточных сигнальных систем [1]. Межнейронные связи в мозге образуются, усиливаются и становятся более обширными в результате синаптических модуляций, зависящих от опыта [2]. Один нейрон может входить во множество сетей, которые могут ассоциироваться. В основе такой ассоциации лежат внутрисинаптические и внутриклеточные молекулярные реакции, которые инициируются внешними воздействиями. Все это в конечном счете служит базисом обучения и запоминания на молекулярном уровне, а также опосредует анализ и дополнение образа внешнего сигнала, обеспечивая опережающее отражение внешней среды. Однако конкретные механизмы работы и контроля этой молекулярной машины пока до конца не ясны.

Функционирование когнитивной системы невозможно без информации о состоянии организма, который выступает для нейронов внешней средой. Взаимодействие мозга и организма двунаправленное. Ряд периферических гормонов проникают в мозг и, помимо контроля метаболических процессов организма, оказывают модулирующее влияние на саму когнитивную систему. Однако молекулярные механизмы такого взаимодействия до конца не ясны. Известно, что метаболические нарушения и патологии часто сопровождаются когнитивными расстройствами различной выраженности [3–6]. В данной работе мы рассмотрим модулирующее влияние гормонов лептина и инсулина на когнитивную систему на уровне нейронов поля CA1 гиппокампа. Их эффекты разнонаправлены. В своем исследовании мы рассмотрим вклад этих гормонов в регулирование плотности рецепторов, обеспечивающих эффективность возбуждающей синаптической передачи в гиппокампе.

## Влияние лептина и инсулина на плотность синаптических рецепторов

Синапсы являются по своей сути сенсорами в когнитивной системе. Помимо основного медиаторного сигнала, они способны воспринимать сигналы иных модальностей. Гиппокамп вовлечен как в реализацию высших когнитивных функций, так и в модуляцию широкого спектра физиологических процессов в организме [3, 7, 8]. Синапсы

его когнитивной системы обеспечивают прием и обработку сигналов и их передачу в кору. На постсинаптической части синапсов его пирамидных нейронов, помимо глутаматных рецепторов, располагаются рецепторы других медиаторных систем, рецепторы целого ряда гормонов [4, 5, 9, 10].

В базе данных GeneNet (Роспатент № 990006 от 15.02.1999) представлена модель межклеточных взаимодействий, регулирующих синаптическую эффективность в течение долговременной потенциации (ДВП) в поле CA1 гиппокампа (<http://www.mgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/viewer/AMPA.html>) [11]. Эта модель использовалась нами в качестве инструмента анализа молекулярных путей реализации эффектов лептина и инсулина на когнитивную систему в гиппокампе.

Лептин и инсулин продуцируются белой жировой тканью и поджелудочной железой соответственно и задействованы в обеспечении метаболизма организма и контроля веса тела [5, 12]. Кроме этого, лептин регулирует синаптогенез и взрослый нейрогенез, оказывает прокогнитивное и антидепрессивное действие на центральную нервную систему [13, 14]. Инсулин вовлечен в формирование памяти [6, 15, 16].

В гиппокампе возбуждающая нейротрансмиссия контролируется макрокомплексами ионотропных глутаматных рецепторов, в частности НМДА (N-метил-D-аспартат) и АМПА ( $\alpha$ -амино-3-гидрокси-5-метил-4-изоксазолпропионовая кислота) типов. АМПА-рецепторы с субъединицами GluR2 и GluR3 (GluR2/3-АМПА) определяют базовую нейротрансмиссию и индукцию ДВП. После индукции ДВП под контролем НМДАР происходит интенсификация эндоцитоза GluR2/3-АМПА и введение GluR1-АМПА (с субъединицей GluR1). GluR1-АМПА формируют новую плотность АМПА в зоне синаптического контакта, что, как общепризнано, и определяет эффективность возбуждающей синаптической передачи. Поддержание нового уровня нейротрансмиссии сопряжено с заменой GluR1-АМПА на GluR2/3-АМПА, плотность которых далее поддерживается конститутивным рециклированием [11, 17, 18].

Инсулин и его субстрат IRS (insulin receptor substrate) активируют, главным образом, сигнальный путь фосфатидилинозитол-3-киназы (ФИЗК), что обеспечивает генерацию ФИФ3 (фосфатидилинозитол-3,4,5-трифосфат). Причем степень активации пути часто зависит от количества гормона и присутствия различных стыковочных белков [19]. Huang с соавторами показали, что непродолжительная инкубация с инсулином приводит к выведению синаптических GluR2/3-АМПА, со-

провожающемуся активацией ФИЗК и протеинкиназы С (ПКС), что при этом не зависело от НМДАР [20].

Лептин оказывает пропотенцирующее влияние на ДВП [13]. Преинкубация с ним приводила к увеличению на мембране GluR1-АМПАР после индукции ДВП в поле СА1 гиппокампа, что сопровождалось накоплением ФИФЗ и дезактивацией ключевого антагониста ФИЗК фосфатазы PTEN (сокр. от англ. phosphatase and tensin homolog deleted on chromosome 10). Moulт подчеркивает, что эффекты лептина для плотности GluR1-АМПАР после индукции зависимой от НМДАР ДВП не реализуются в присутствии блокаторов ФИЗК, что говорит о прямой вовлеченности данной протеинкиназы в описываемые процессы [21].

Таким образом, ключевой точкой в реализации эффектов инсулина и лептина на синапсах гиппокампа является активация протеинкиназы ФИЗК и накопление ее продукта – ФИФЗ. При этом действие лептина сопряжено с активностью НМДАР, а реализация эффектов инсулина – нет.

Взяв за основу модель динамики плотности синаптических АМПАР после индукции ДВП, представленную в базе данных GeneNet (<http://www.mgs.bionet.nsc.ru/mgs/gnw/genenet/viewer/AMPA.html>), мы реконструировали на основании литературных источников PubMed вероятные межбелковые взаимодействия в интерактоме дендритного шипика, обеспечивающие эффекты лептина и инсулина для когнитивной системы.

ФИЗК представляет гетеродимер двух субъединиц: регуляторной p85 и каталитической p110. Регуляторная субъединица в цитоплазме взаимодействует с каталитической через свои SH2 (Src-like homology) домены, блокируя ее активность [22]. ИР и IRS обеспечивают прямое закрепление на своих фосфотирозиновых остатках (на канонических мотивах pYXXM) SH2-доменов p85, что достаточно для активации ФИЗК [23].

ФИЗК будет продуцировать ФИФЗ, которые служат местами закрепления ряда белков, в частности протеинкиназы PDK1, которая является мастер-киназой для протеинкиназ семейства AGC, к которому относится протеинкиназа ПКС. Фосфорилирование PDK1 активационной петли ПКС является ключевым этапом в созревании фермента, обеспечивает стабильную работу [24]. ПКС, с одной стороны, способствует выведению синапсов GluR2/3-АМПАР (через фосфорилирование S880 на цитоплазматическом домене GluR2 субъединицы) [25], с другой – будет способствовать inserции на синапсы GluR1-АМПАР после индукции НМДАР-зависимой ДВП (через фосфорилирование S818) [26] (рисунк).

Таким образом, инсулин через свой рецептор ИР и IRS будет способствовать локальному повышению созревших ПКС, что и обеспечивает выведение GluR2/3-АМПАР из синапсов. Но в то же время инсулин через ПКС может способствовать закреплению синаптических GluR1-АМПАР. Это может объяснять, по крайней мере на уровне постсинапса, разнонаправленные эффекты на

уровне постсинапса, разнонаправленные эффекты инсулина в течение развития ДВП [27]. Преинкубация с инсулином, следовательно, будет снижать пул GluR2/3-АМПАР на синапсах, которые обеспечивают как базовую нейротрансмиссию, так и индукцию зависимой от НМДАР ДВП.

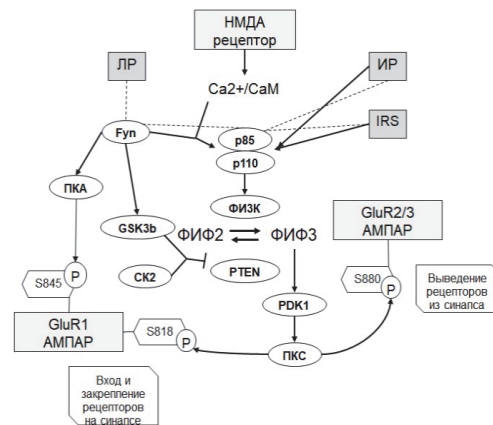


Схема влияния рецепторов лептина и инсулина на динамику синаптических АМПАР различного субъединичного состава:  $\dashv$  – блокирующее влияние; стрелки – активирующее влияние; пунктир – прямое взаимодействие между белками; ЛР – рецептор лептина; ИР – инсулиновый рецептор; IRS – субстрат ИР; GluR1, GluR2/3 – субъединицы АМПА-рецепторов; ФИЗК – фосфоинозитид-3-киназа; p85 и p110 – регуляторная и каталитическая субъединицы ФИЗК соответственно; Fyn – нерцепторная тирозинкиназа Fyn подсемейства Src; ПКС – протеинкиназа С; PKA – протеинкиназа А; GSK3b – синтаза гликогенсинтазы 3 бета; PTEN – phosphatase and tensin homolog deleted on chromosome 10; CK2 – казеинкиназа 2; PDK1 – фосфоинозитид-зависимая протеинкиназа 1; Ca/CaM – кальций/кальмодулиновый комплекс; ФИФ3 – фосфатидилинозитол-3,4,5-трифосфат; ФИФ2 – фосфатидилинозитол-4,5-дифосфат; S – фосфорилируемый остаток серина; (P) – фосфатная группа

Сигнальный путь рецептора лептина хорошо описан: лептин/ЛР/SHP2/Grb2/Raf/Mek/Erk [28].

Рецептор лептина не обладает каноническими мотивами YXXM, которые могли бы напрямую закрепить регуляторную субъединицу p85 и запустить сигнальный путь ФИЗК. Ранее нами был проведен биоинформационный анализ доменной организации представленных в базе данных GeneNet синаптических белков, гипотетически способных обеспечивать запускаемое лептином накопление ФИФЗ и увеличение плотности синаптических GluR1-АМПАР [29].

Мы выдвигаем гипотезу, что нерцепторная тирозинкиназа Fyn семейства Src может непосредственно закрепляться на ЛР и захватывать p85/p110 через ее обогащенный пролином участок [29]. Показано, что Fyn влияет на активность каталитической субъединицы PKA (продлонгирует ее активность) [30]. PKA фосфорилирует GluR1 на серине S845, что является необходимым условием для их успешной инкорпорации на синапсе после индукции ДВП [31, 32]. Следовательно, преинкубация с лептином будет способствовать накопле-



нию пула GluR1-АМПАР до индукции ДВП: лептин/ЛР/Фун/ПКА/p845GluR1. Кроме того, Фун полностью активирует GSK3 $\beta$  (киназа гликогенсинтазы 3 бета; Glycogen synthase kinase 3 beta), которая ингибирует антагониста ФИЗК РТЕН [21]. Полная активация p85/p110 может достигаться входящими через НМДАР ионами кальция [33]. Таким образом, Фун будет обеспечивать пространственное сближение p85/p110 с белками макрокомплекса НМДАР, выступая в роли точки пересечения сигнальных путей НМДАР и рецептора лептина. Ингибирование РТЕН будет способствовать накоплению пула ФИФ3 и, по аналогии с инсулином, приводить к увеличению пула процессированной ПКС, активность которой обеспечивает устойчивое развитие ДВП как через выведение GluR2-АМПАР, так и через закрепление входящих из околосинаптической зоны в синапс GluR1-АМПАР (см. рисунок).

Резюмируя, можно сделать вывод, что лептин выступает в качестве предподготавливающего фактора на уровне синапса. Концентрация лептина увеличивается после приема пищи, что позволяет рассматривать его в качестве агента, информирующего когнитивную систему о наличии доступных энергетических ресурсов в непосредственно окружающей ее среде (организм).

Одним из эффектов инсулина является встраивание в мембрану транспортеров глюкозы GLUT [6]. В гиппокампе экспрессируются GLUT3 и GLUT4, кроме того показано их зависимое от НМДАР встраивание в мембрану под контролем инсулина [34, 35]. Однако глюкоза, в отличие от периферических тканей и клеток глии, не служит нейронам как источник непосредственно энергии, а является необходимым субстратом для синтеза нуклеотидов и белков, обеспечивающих регенерацию глутатиона, белка антиоксидантной системы защиты мозга [36, 37]. Кроме того, в литературе упоминается тот факт, что присутствие перекиси, концентрация которой растет при активации митохондрий, способствует развитию эффектов инсулина в мозге [6].

Таким образом, инсулин в когнитивной системе можно рассматривать как сигнал о вероятности перевозбуждения сети, а также как агент запуска защитных и репарационных систем. Снижая через уменьшение плотности синаптических АМПАР локальную возбудимость, инсулин будет способствовать сохранению гомеостатического равновесия тормозных и возбуждающих сетей в когнитивной системе.

### Литература

1. Proskura, A.L. et al. Synapse as a multi-component and multi-level information system // *Studies in computational intelligence*. 2018. V. 736. P. 186–192.
2. Fuster, J.M. Cortex and Memory: Emergence of a New Paradigm // *J. Cognitive Neurosci.* 2009. V. 21. P. 2047–2072.
3. Lathe, R. Hormones and the hippocampus // *J. Endocrinol.* 2001. V. 169, № 2. P. 205–231.
4. Harvey, J. et al. Leptin and its role in hippocampal synaptic plasticity // *Prog. Lipid Res.* 2006. V. 45, № 5. P. 369–378.
5. Бондарева, В.М., Чистякова, О.В. Инсулин и инсулинрецепторная сигнальная система мозга // *Нейрохимия*. 2007. Т. 23, № 31. С. 8–20.
6. Помяткин, И.А. и др. Инсулиновый рецептор в мозге: новая мишень в лечении центральной инсулиновой резистентности // *Биомедицина*. 2018. Т. 3. С. 17–34.
7. Kjelstrup, K.B. et al. Finite scale of spatial representation in the hippocampus // *Science*. 2008. V. 321. P. 140–143.
8. Hawley, D.F. et al. Differential response of hippocampal subregions to stress and learning // *PLoS One*. 2012. V. 7. P. e53126.
9. Proskura, A.L. et al. Dopamine and hippocampal synaptic plasticity // *Procedia Computer Science*. 2020. V. 169. P. 668–672.
10. Berrou, L., Isokawa, M. Ghrelin upregulates the phosphorylation of the GluN2B subunit of the NMDA receptor by activating GHSR1a and Fyn in the rat hippocampus // *Brain Res*. 2018. V. 1678. P. 20–26.
11. Проскура, А.Л. и др. Межмолекулярные взаимодействия в функциональных системах нейрона // *Вавилонский журнал генетики и селекции*. 2013. Т. 17. С. 620–628.
12. Jequier, E. Leptin signaling, adiposity, and energy balance // *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2002. V. 967. P. 379–388.
13. Oomura, Y. et al. Leptin facilitates learning and memory performance and enhances hippocampal CA1 long-term potentiation and CaMK II phosphorylation in rats // *Peptides*. 2006. V. 11. P. 2738–2749.
14. Van Doorn, C. et al. Leptin resistance and hippocampal behavioral deficits // *Physiol Behav*. 2017. V. 176. P. 207–213.
15. Huang, C.C. et al. The role of insulin receptor signaling in synaptic plasticity and cognitive function // *Chang Gung Med. J.* 2010. V. 33, № 2. P. 115–125.
16. Lee, S.-H. et al. Insulin in the nervous system and the mind: functions in metabolism, memory, and mood // *Mol. Metab.* 2016. V. 5, № 8. P. 589–601.
17. Newpher, T.M., Ehlers, M.D. Glutamate receptor dynamics in dendritic microdomains // *Neuron*. 2008. V. 58. P. 472–497.
18. Tanaka, H., Hirano, T. Visualization of subunit-specific delivery of glutamate receptors to postsynaptic membrane during hippocampal long-term potentiation // *Cell. Rep.* 2012. V. 1. P. 291–298.
19. Mendoza, M.C. et al. The Ras-ERK and PI3K-mTOR pathways: cross-talk and compensation // *Trends Biochem Sci.* 2011. V. 36, № 6. P. 320–328.
20. Huang, C.C. et al. An investigation into signal transduction mechanisms involved in insulin-induced long-term depression in the CA1 region of the hippocampus // *J. Neurochem.* 2004. V. 89, № 1. P. 217–231.
21. Moul, P.R. et al. Leptin regulates AMPA receptor trafficking via PTEN inhibition // *J. Neurosci.* 2010. V. 30. P. 4088–4101.
22. Yu, J. et al. Regulation of the p85/p110 phosphatidylinositol 3'-kinase: stabilization and inhibition of the p110 $\alpha$  catalytic subunit by the p85 regulatory subunit // *Mol. Cell. Biol.* 1998. V. 18, № 3. P. 1379–1387.
23. Yu, J. et al. Regulation of the p85/p110 $\alpha$  phosphatidylinositol 3'-kinase. Distinct roles for the n-terminal and C-terminal SH2 domains // *J. Biol. Chem.* 1998. V. 273, № 46. P. 30199–30203.
24. Pearce, L.R. et al. The nuts and bolts of AGC protein kinases // *Nat. Rev. Mol. Cell. Biol.* 2010. V. 11, № 1. P. 9–22.
25. Seidenman, K.J. et al. Glutamate receptor subunit 2 Serine 880 phosphorylation modulates synaptic transmission and mediates plasticity in CA1 pyramidal cells // *J. Neurosci.* 2003. V. 23, № 27. P. 9220–9228.

26. *Boehm, J. et al.* Synaptic incorporation of AMPA receptors during LTP is controlled by a PKC phosphorylation site on GluR1 // *Neuron*. 2006. V. 51, № 2. P. 213–225.
27. *Fangli, Z. et al.* Insulin Modulates Excitatory Synaptic Transmission and Synaptic Plasticity in the Mouse Hippocampus // *Neuroscience*. 2019. V. 411. P. 237–254.
28. *Fruhbeck, G.* Intracellular signalling pathways activated by leptin // *Biochem. J.* 2006. V. 393. P. 7–20.
29. *Проскура, А.Л. и др.* Перекрестные связи между сигнальными путями глутаматных и лептиновых рецепторов // *Молекулярная биология*. 2021. Т. 55, № 3. С. 1–9.
30. *Schmoker, A.M. et al.* Fyn regulates binding partners of cyclic-AMP dependent protein kinase A // *Proteomes*. 2018. V. 6, № 4. P. 37.
31. *Roche, K.W. et al.* Characterization of multiple phosphorylation sites on the AMPA receptor GluR1 subunit // *Neuron*. 1996. V. 16. P. 1179–1188.
32. *Banke, T.G. et al.* Control of GluR1 AMPA receptor function by cAMP-dependent protein kinase // *J. Neurosci.* 2000. V. 20, № 1. P. 89–102.
33. *Wang, G. et al.* Interaction of calmodulin with the cSH2 domain of the p85 regulatory subunit // *Biochemistry*. 2018. V. 57, № 12. P. 1917–1928.
34. *Jainne, M. et al.* Activity-dependent regulation of surface glucose transporter-3 // *J. Neurosci.* 2011. V. 31, № 6. P. 1991–1999.
35. *Grillo, C.A. et al.* Insulin-stimulated translocation of GLUT4 to the plasma membrane in rat hippocampus is PI3-kinase dependent // *Brain Res.* 2009. V. 1296. P. 35–45.
36. *Peters, A. et al.* The selfish brain: competition for energy resources // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2004. V. 28, № 2. P. 143–180.
37. *Самохина, Е.* «Прожигатель» энергии // *Наука и жизнь*. 2017. № 4. С. 143–180.



# Моделирование и анализ функциональных свойств базовых агентов когнитивных систем

А.С. Ратушняк, **Г.А. Запара**, А.Л. Проскура, А.М. Брелов

Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, г. Новосибирск  
email: ratushniak.alex@gmail.com

## Введение

Система знаний о свойствах биологических информационных систем важна в областях информатики и биомедицины. Однако на пути анализа таких систем существует ряд препятствий, преодоление которых при нынешнем подходе к решению этой задачи достаточно проблематично. Работа биосистем любого уровня базируется на функциональных свойствах их элементарных единиц – клеток. При этом клетки, в особенности нейроны, по существу являются молекулярными информационными системами, ориентированными на прием информации от сенсоров, ее анализ и принятие управляющих решений, зависящих от результатов такого анализа.

В таких исследованиях возникают проблемы, обусловленные чрезвычайной и практически неупрощаемой сложностью биологических информационных систем. Самые простые из таких систем состоят из многих тысяч различных функциональных элементов. При этом во многом неизвестны как функции этих элементов, так и динамика и порядок их взаимодействия. Строящиеся в рамках биоинформационных методов упрощенные карты взаимодействий элементов, естественно в силу их упрощенности, не позволяют сделать достаточно обоснованные заключения о функциях и тем более принципах работы системы в целом.

Экспериментальные исследования систем, работающих на молекулярном уровне, ограничены практически отсутствием методов и технологий, позволяющих полноценно взаимодействовать с их внутриклеточными информационными сетями. Такие сети состоят из многих тысяч звеньев приема и обработки информации. Существующие электрофизиологические, оптогенетические и другие методические приемы позволяют взаимодействовать с очень ограниченным количеством элементов информационной системы клетки. Это не позволяет экспериментально определить полную динамику работы молекулярной машины и, следовательно, приблизиться к пониманию ее функции.

Таким образом, существующие методологии практически не дают возможности получить продуктивные результаты по созданию достаточно полной модели биологических информационных систем, даже достаточно простых. Соответственно, возможности достичь значимых результатов в понимании основной функции, принципов и механизмов их работы в рамках существующих подходов весьма ограничены. Необходимость поиска новых концепций и методов решения таких теоретически и практически важных задач обсуждается

на форумах и в публикациях многих ведущих исследователей.

Одним из таких подходов может быть создание модели формирования предельно простых биологических систем из молекулярных конструкций, спонтанно возникающих в среде при определенных условиях. Моделирование эволюции таких первичных агентов архибииотов до уровня существующих систем позволит, вероятно, приблизиться к пределу возможностей инструментального моделирования. При этом не будет возникать необходимость изначального упрощения, неизбежного при моделировании «сверху вниз», но недопустимого для достаточно сложных систем. В таких моделях, естественно, не будут возникать потери значимых параметров, происходящие зачастую при классическом подходе.

Однако неопределенностью самого понятия «живые системы» создает трудности при попытках их моделирования. Существует несколько сотен определений таких систем [1]. В НАСА определяют жизнь как «самоподдерживающуюся химическую систему, способную претерпевать дарвиновскую эволюцию». Edward Trifonov свел это понятие к «самовоспроизведению с вариациями» [2], т. е., по существу, к «генетической» концепции. Это, безусловно, противоречит известным фактам наличия не самовоспроизводящихся биосистем. Например, нейроны, эритроциты и другие, несомненно, живые организмы.

## Предпосылки возникновения и существования биоинформационных когнитивных систем

Для создания модели базового агента в работе мы будем исходить из представления о живых системах как о *цифровых, не бинарных, логических молекулярных машинах, основная функция которых сводится к сохранению негэнтропии (гомеостаза) на основе прогнозирования, использующего ранее полученную (записанную) информацию*. Основная парадигма работы живых систем, на наш взгляд, должна базироваться на таких физических представлениях. При этом более понятным становится механизм возникновения спонтанного формирования предельно простых молекулярных машин, обладающих признаками живых систем. Такие молекулярные конструкции могли возникнуть в среде, содержащей достаточно простые органические молекулы, простым их слиянием. При этом некоторые из молекул в этих конструкциях при взаимодействии с факторами среды выполняли функции рецепторов. Другие, обладающие меха-

но- или ионотропностью, могли выполнять роль эффектора, смещающего эту простую конструкцию в пространстве либо изменяющего ионный состав среды, к примеру. Простая липидная оболочка позволяла поддерживать целостность конструкции в отсутствие повреждающих воздействий факторами среды. Взаимодействие молекул с факторами среды (рецептирование сигналов), несущих разный энтропийный потенциал, позволяло в случае ассоциации факторов-сигналов, приносящих большее и меньшее увеличение энтропии, фиксировать (запоминать) на молекулярном уровне такую ассоциацию. В результате такого «запоминания» рецептор сигнала, предшествующего фактору, вызывающему большую энтропию, мог получать непосредственную связь с эффектором. Тем самым системой приобреталась информация о свойствах среды. То есть при повторении комбинации низкоуровневого и высокоуровневого воздействия среды первый низкоуровневый фактор становился прогностическим. Агент благодаря этому приобретал свойство избегать или уменьшать потери. Появление такого свойства позволяло агенту избегать большего повреждения и давало преимущество более продолжительного сохранения в среде. Аналогично могли функционировать молекулярные комплексы, увеличивающие запас негэнтропии.

Принцип, связывающий энтропию и информационные процессы, был сформулирован многими авторами, например [3–5]. В живых системах, согласно этому негэнтропийному принципу, информация может вносить отрицательный вклад в энтропию. На этом физическом принципе базируется существование биологических, термодинамически открытых, систем. Он основан на записи информации о факторах взаимодействия со средой и использовании этой информации для прогнозирования и принятия решений для сохранения своего состояния. Одним из основных обобщений, касающихся роли прогностики в биологии, является понятие опережающего отражения реальности, сформулированное П.К. Анохиным [6, 7].

Таким образом, при возникновении первичных живых систем могли флюктуационно формироваться предельно простые молекулярные конструкции уже с некоторым запасом, избытком упорядоченности – негэнтропии  $N$ . Воздействие процессов, происходящих в окружающей энтропийной среде, приводило к уменьшению этой упорядоченности, уменьшая суммарную негэнтропию:

$$\Sigma N = N - \Delta N + I \rightarrow N \cdot K_i$$

Приобретенная информация в дальнейшем используется молекулярной системой для уменьшения энтропии с некоторым коэффициентом  $K_i$ , создавая дополнительный запас негэнтропии. Это возможно, если в среде осуществляются ассоциированные процессы, а молекулярная конструкция обладает способностью это фиксировать (изменением конформации молекул, например). При следующем взаимодействии с первым из ассоциированных факторов он вызывал действие, опере-

жающее внешнее событие, и система реагировала по ранее зафиксированному алгоритму, сохраняя свое состояние.

В ходе эволюционного отбора на базе слияния и дробления возникали комплексы с большим количеством рецепторов и эффекторов. Это, естественно, увеличивало количество информации, приобретаемой системой, и, соответственно, устойчивость таких структур в среде. От спонтанного формирования подобных молекулярных комплексов происходил переход к появлению системы воспроизведения наиболее устойчивых конструкций. Такие «генетические» системы воспроизведения формировались, вероятно, на базе автокаталитических процессов.

### Моделирование базовых агентов когнитивных систем

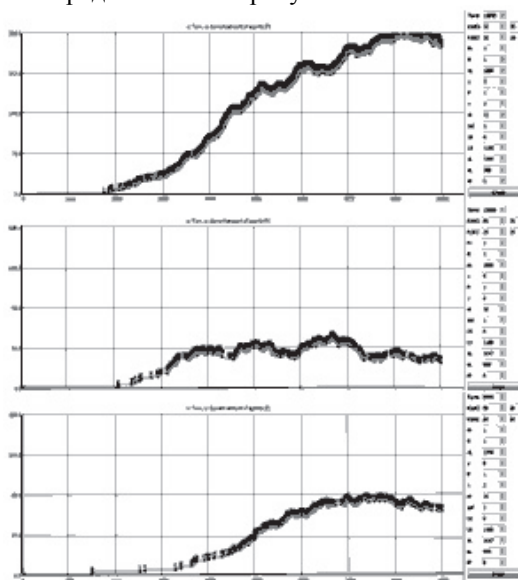
В настоящее время возможность создания информационных систем, соизмеримых по возможностям с функциями мозга, связывается в основном с методами глубокого обучения нейронных сетей. Однако понятно, что сходство биологических и существующих технических систем больше метафорическое, чем концептуальное. Значительные успехи в области технических нейронных систем, достигнутые в последние несколько лет, в основном обусловлены успехами технологии и разработок в области вычислительной техники. Однако экстенсивный рост ресурсов этой техники практически достиг предела из-за физических ограничений. Рост тактовой частоты выше 4–5 ГГц приводит к квадратичному росту тепловыделения, а уменьшение размера элемента к уменьшению надежности. В связи с этим формируются задачи, расширяется поиск принципов и материальных носителей, составляющих основу биологических молекулярных информационных систем. Предпринимаются попытки формирования новых концепций, основанных на понимании, что основная элементная база биосистем, возникшая несколько миллиардов лет назад, наследуется от эволюционных предшественников, а именно от простых молекулярных конструкций [8, 9].

На базе естественно-научных представлений о возникновении живых систем и их негэнтропийной природе [6–11] разработана модель ассоциативного логического агента как их архибионтного прототипа. Сформирована модель среды с определенным наполнением элементами, из которых могут спонтанно с определенной вероятностью формироваться агенты с сигнальным наполнением различной модальности и уровнем энтропии.

В процессе моделирования в среде оптимизировано количество элементов (обладающих логическими функциями), определяющих вероятность возникновения агента. Определен набор условий, коэффициентов и правил взаимодействия агентов и среды, стабилизирующих систему в целом. Постулировано, что агент формируется в среде с определенным запасом  $lifeEnergy$ , изначально равным  $INITIAL\_LIFE\_ENERGY$ . Агент обладает

рядом разномодальных рецепторов сигналов из внешней среды и эффекторов, влияющих на взаимодействие агента со средой. При активации рецепторов сигналами среды осуществляется определение влияния этих процессов на запас lifeEnergy. При наличии нескольких сигналов происходит логический анализ их ассоциативности. Определяются сигналы, ведущие к уменьшению и увеличению lifeEnergy, и запоминается их ассоциация.

Если сигнал с меньшими затратами предшествует сигналу с большими затратами, то после запоминания ассоциативной пары реакция агента на первый сигнал включает эффектор, обеспечивающий избегание воздействия второго, т.е. использование приобретенной информации позволяет сократить потерю энергии агентом. Если первый сигнал предшествует сигналу, ассоциированному с приобретением lifeEnergy, то реакция агента на первый сигнал в ассоциативной паре позволяет приобрести lifeEnergy. В результате оптимизации значений коэффициентов удалось получить устойчивое состояние агента во внешней среде. Результаты вариантов изменения lifeEnergy агента при различных значениях параметров среды и агента представлены на рисунке.



Пример изменения запасов энергии модельного агента при его взаимодействии со средой. При заданных параметрах среды и агента. По оси  $X$  – время от момента возникновения агента, по оси  $Y$  – запас энергии агента lifeEnergy

### Заключение

Таким образом, концепция негэнтропийной прогностической природы биосистем, вероятно,

должна лежать в основе создания их модели. Такая модель, естественно, необходима для понимания функции и механизмов работы биоинформационных систем разного уровня сложности. В информационной сети клетки присутствуют многоуровневые цепи передачи информации.

Анализ сигнальной сети нейрона, основанный на описанной концепции, позволяет предположить, что базовой функцией клетки, как и первичных архибактериот, является рецепция сигналов среды, поиск в них и запоминание ассоциативности информации. Эта информация используется для прогнозирования (опережающего отражения) будущего состояния среды и реализации функции борьбы с энтропией (сохранение гомеостаза).

Представленные в статье данные получены в ходе реализации базового проекта фундаментальных исследований РАН VI.35.2.6.

### Литература

1. *Trifonov E.N.* Vocabulary of Definitions of Life Suggests a Definition // *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2011. V. 29(2). P. 259–266; doi: 10.1080/073911011010524992.
2. *Di Mauro E.* Trifonov's Meta-Definition of Life // *Journal of Biomolecular Structure and Dynamics*. 2012. V. 29(4). P. 601–602.
3. *Johansson F. et al.* Memory trace and timing mechanism localized to cerebellar Purkinje cells // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2014. V. 111(41). P. 14930–4.
4. *Larkum M.A.* cellular mechanism for cortical associations: an organizing principle for the cerebral cortex // *Trends Neurosci*. 2013. V. 36(3). P. 141–151.
5. *Schrödinger E.* What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge: University Press, 1944. 92 p.
6. *Anokhin P.K.* Anticipatory reflection of reality // *Vopr. Philosophy*. 1962. № 6. P. 97–109.
7. *Anokhin P.K.* Principal issues of the theory of functional systems. Philosophical aspects of the theory of functional systems. M.: Science, 1978. P. 49–106. [In Russian].
8. *Brillouin L.* Science and Information Theory. Academic Press, 1962. 351 p.
9. *Krushinsky A.* Payment for solving the problem: biophysical prerequisites and possible evolutionary consequences // *Russian Journal of Cognitive Science*. 2015. V. 2, № 1.
10. *Hirst A.R., Escuder B., Miravet J.F., Smith D.K.* High-tech applications of self assembling supramolecular nanostructures gel phase materials: From Regenerative Medicine to Electronic Devices // *Angew. Chem. Int. Ed*. 2008. V. 47(42). P. 8002; doi: 10.1002/anie.200800022.
11. *Tsitlovsky L.* Consciousness, endogenous generation of goals and homeostasis // *International Journal of General Systems*. 2015. V. 44, № 6. P. 655–666; doi: 10.1080/03081079.2015.1032527.

# Нейропсихологические корреляты внимания человека на ЭЭГ в монотонной активности: устойчивость при хронических болевых синдромах и возрастных изменениях

А.Е. Руннова<sup>1,2</sup>, Р.Р. Парсамян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
email: runnova.ae@staff.sgmu.ru

В настоящее время в развитых странах наблюдается выраженная тенденция старения популяции, что сопровождается целым рядом социально-медицинских проблем, среди которых можно выделить увеличение роста когнитивных нарушений различной этиологии с достижением зрелого возраста. Доля лиц, страдающих умеренными когнитивными нарушениями, достигает в среднем от 16 до 19 % [1–5]. В течение года прогрессирование когнитивных нарушений до степени деменции наблюдается приблизительно у 15 % пациентов с умеренными когнитивными расстройствами старше 40 лет, спустя три года уже 50 % больных данной категории соответствуют диагностическим критериям деменции, а через шесть лет количество таких пациентов может достигать 80 % [5, 6].

Адекватное определение изменений когнитивных функций является крайне актуальным для современной теоретической и прикладной науки и клинической практики. На сегодня инструментарий исследователя ограничен, по большому счёту, рядом психометрических опросников и тестов, таких, например, как шкала МОСА [7] и её разнообразные аналоги. Однако подобные методы страдают малой специфичностью и ограниченными возможностями при выявлении слабых когнитивных нарушений и пограничных состояний в начальной стадии. В то же время раннее выявление когнитивных проблем представляет важную задачу в клинической практике. Именно количественная диагностика первых ранних стадий состояний снижения когнитивных функций может позволить выполнить дополнительное обследование пациента, назначить превентивное лечение и т. д.

Современная практическая и теоретическая наука пытается решить эту задачу поиска надежных биомаркеров когнитивных нарушений и/или склонности к ним на основе различных технологий – анализа гормонального фона [8], поиска анатомических изменений в строении и функциональных связях определённых зон головного мозга с помощью методов нейровизуализации [9], а также на основе мониторинга параметров активности головного мозга [4]. Очевидно, с точки зрения технических возможностей идеальным кандидатом на мониторинг активности головного мозга является электроэнцефалография (ЭЭГ) в связи с дешёвизой, простотой использования, а также возможности применения практически в любых условиях окружающей среды.

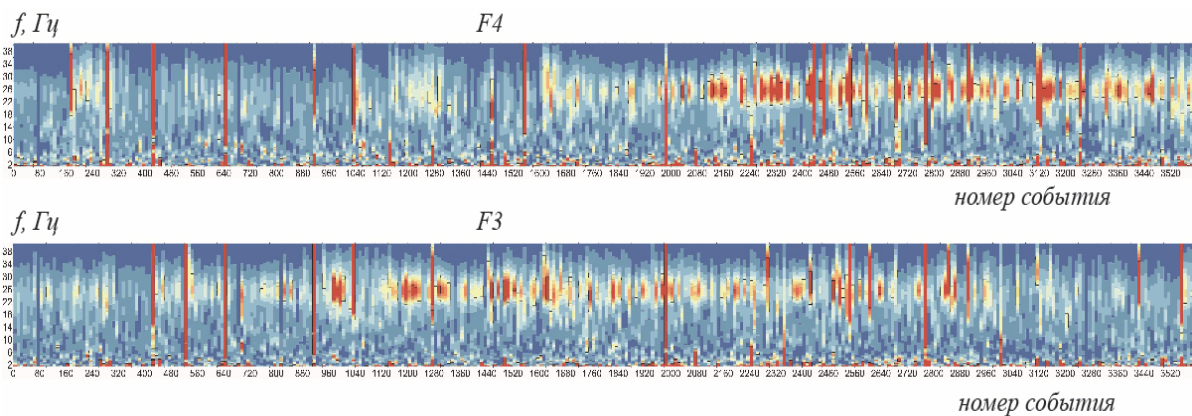
На практике широкое клиническое использование ЭЭГ ограничено целым рядом хорошо из-

вестных проблем: наличием больших шумов и помех в регистрациях; отсутствием регулярных устойчивых форм сигналов даже для одного испытуемого; большой индивидуальной изменчивостью по частотным характеристикам, пространственным зонам и пр. В то же время сегодня уже существуют относительно хорошо зарекомендовавшие себя экспериментальные методики обработки ЭЭГ-сигналов, основанные на автоматической настройке математического аппарата для каждого объекта исследований. В частности, в работе [10] удаётся добиться распознавания моментов воображения человеком движения, в работе [11] уверенно обнаруживается состояние потери внимания испытуемого к демонстрируемым объектам. Среди общих и лежащих на поверхности ограничений описываемых в подобных работах методик всегда лежит малое количество испытуемых, большое количество ЭЭГ-электродов, требуемых для корректной работы, строгих экспериментальных условий, хорошая мотивация участников исследования и пр. Несомненно, в связи со всем вышесказанным до сих пор применение научных методик в клинической практике достаточно осложнено.

Базис подобных научных работ по ЭЭГ-обработке основан на наличии некоторых тестовых записей испытуемого, на которых математический аппарат предлагаемого метода «обучается» алгоритмическим образом или с помощью искусственных нейронных сетей. Для задач поиска биомаркеров когнитивных нарушений описанный подход представляется спорным, поскольку открытым остаётся вопрос характеристик сигналов, на которых было бы возможно проведение «настройки» математического аппарата.

Таким образом, на сегодня в основе поиска биомаркеров когнитивных нарушений оказывается фундаментальная работа по определению характерных особенностей динамики головного мозга, хотя бы в какой-то степени специфичных в начале развития когнитивной недостаточности. В данном докладе мы рассказываем о попытке комбинации двух подходов к интерпретации ЭЭГ-сигналов пациентов: анализа колебательной активности данных энергетического анализа в различных частотных диапазонах и выполнения унификации данных посредством усреднения.

В качестве основы математического аппарата для анализа колебательной активности на ЭЭГ было использовано непрерывное вейвлетное преобразование (НВП) с комплексными базисами [12].



Результаты интегральной методики пространственно-частотного анализа колебательной активности по однотипным событиям (звуковому стимулу). Каждое предъявление стимула рассматривается как отдельное событие. Результаты представлены для двух каналов ЭЭГ – F3 и F4. Оси ординат – частоты колебательной активности, оси абсцисс – номера событий

В то же время в классической нейрофизиологии основным методом анализа электрической активности головного мозга при многократно повторяемых однотипных пробах является усреднение регистрируемых сигналов. При таком простом анализе удаётся оценить основные амплитудные составляющие сигналов, вызываемые именно основным при пробе стимулом (например, вызванные потенциалы). В то же время происходит потеря информации об изменении отклика пациента в динамике эксперимента. Нами разработан и апробирован метод анализа интегрального энергетического анализа для каждой частотной компоненты, интересной для исследователя. Работа данного метода проиллюстрирована на рисунке. Испытуемые были проинструктированы при звуковом стимуле нажимать кнопку пульта. На приведённой иллюстрации динамика во фронтальных ЭЭГ-отведениях для каждого демонстрирует повышение колебательной активности на высоких частотах (бета- и гамма-диапазоны) для правого отведения лишь после достаточно длительного эксперимента. Иными словами, наблюдается эффект переключения высокочастотной активности из левого полушария в симметричное отведение в правом. Возможность анализа подобных событий и введения простых и однозначных численных критериев на их основе ляжет в основу дальнейшего создания различных нейромаркеров, коррелирующих со снижением когнитивных функций испытуемых.

В настоящее время нами произведены предварительные оценки с помощью данной методики значительной базы данных пациентов различных возрастных групп (от 20 до 70 лет), включая контрольную часть практически здоровых участников и пациентов с хроническими болевыми синдромами (головной болью различной этиологии). У всех участников научно-исследовательской работы удалось продемонстрировать два устойчивых сценария изменения активности головного мозга: 1) слабое изменение уровня альфа-активности в периоде пассивного отдыха до и после когнитивного теста,

сопровожаемое ростом мощности альфа-активности в частотном диапазоне 9–11 Гц; 2) снижение уровня альфа-активности после прохождения когнитивного теста, а также повышение уровня альфа-активности в области 10–12 Гц к концу выполнения когнитивного теста. Показана значительная взаимосвязь данных характеристик альфаритма в различных интервалах частот с наличием нарушений сна у пациентов. Продемонстрировано, что группы пациентов, разделенные по факторам оценки качества ночного сна на две группы – с трудностями засыпания и нормальным ночным сном, – достоверно различаются согласно критерию Вилкоксона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации государственной поддержки молодых российских ученых (проект МД-645.2020.9).

### Литература

1. Ritchie K., Artero S., Touchon J. Classification criteria for mild cognitive impairment: a population-based validation study // *Neurology*. 2001. V. 56, № 1. P. 37–42.
2. Яхно Н.Н., Захаров В.В., Локишина А.Б. Нарушения памяти и внимания в пожилом возрасте // *Журнал неврологии и психиатрии*. 2006. Т. 106, № 2. С. 58–62.
3. Gauthier S. et al. Mild cognitive impairment // *The Lancet*. 2006. V. 367, № 9518. P. 1262–1270.
4. Meghdadi A.H. et al. Resting state EEG biomarkers of cognitive decline associated with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment // *PloS one*. 2021. V. 16, № 2. Art. e0244180.
5. Petersen R.C. et al. Mild cognitive impairment: clinical characterization and outcome // *Archives of neurology*. 1999. V. 56, № 3. P. 303–308.
6. Farias S.T. et al. Progression of mild cognitive impairment to dementia in clinic-vs community-based cohorts // *Archives of neurology*. 2009. V. 66, № 9. P. 1151–1157.
7. Nasreddine Z.S. et al. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment // *Journal of the American Geriatrics Society*. 2005. V. 53, № 4. P. 695–699.
8. Winston C.N. et al. Growth hormone-releasing hormone modulation of neuronal exosome biomarkers in mild cognitive impairment // *Journal of Alzheimer's Disease*. 2018. V. 66, № 3. P. 971–981.

9. Yu E. *et al.* High-sensitivity neuroimaging biomarkers for the identification of amnesic mild cognitive impairment based on resting-state fMRI and a triple network model // *Brain Imaging and Behavior*. 2019. V. 13, № 1. P. 1–14.

10. Bobrova E.V. *et al.* Use of imaginary lower limb movements to control brain–computer interface systems // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 2020. V. 50, № 5. P. 585–592.

11. Maksimenko V.A. *et al.* Increasing human performance by sharing cognitive load using brain-to-brain interface // *Frontiers in neuroscience*. 2018. V. 12. P. 949.

12. Ghorbanian P. *et al.* Power based analysis of single-electrode human EEG recordings using continuous wavelet transform // 2012 38th Annual Northeast Bioengineering Conference (NEBEC) / IEEE. 2012. P. 279–280.

## Изменение в структуре ЭЖоГ крыс Wistar после звукового воздействия

А.Е. Руннова<sup>2,1</sup>, М.О. Журавлев<sup>1,2</sup>, Н.И. Семенова<sup>1</sup>, А.В. Слепнев<sup>1</sup>, К.С. Сергеев<sup>1</sup>,  
О.В. Семячкина-Глушкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

Сегодня исследование биомедицинских систем на основе математических методов и цифровых технологий является трендом развития междисциплинарной науки. Одним из наиболее мощных направлений подобного развития человеческого знания на сегодня является нейронаука [1–3]. Исследование головного мозга практически без нарушения обычного состояния животного и/или человека стало доступным с середины прошлого века на базе развившихся технологий регистрации активности, в первую очередь – электрической, головного мозга [4, 5]. До сих пор наиболее дешевым, накладывающим слабые ограничения на обычную активность животного/человека и активно используемым в биомедицинских, нейрофизиологических и психометрических работах является электроэнцефалография (ЭЭГ) [6, 7]. В настоящее время этот метод регистрации активности головного мозга применяется как поверхностно (в основном в исследования на людях), так и инвазивно (у различных животных и пациентов, состояние которых требует нейрохирургического вмешательства). Автоматическая обработка ЭЭГ является и основой разработки современных нейроинтерфейсных устройств, и источником объективной информации об особенностях функционирования различных зон головного мозга [8–10]. В то же время сигналы ЭЭГ весьма сложны для анализа по причине многочастотной структуры и сильно нестационарной динамики, обусловленной и самой природой активности структур головного мозга, объединяющего значительные ансамбли нейронов, и особенностями метода регистрации суммарного сигнала со значительной площади коры головного мозга [11–13]. Дополнительно обработка ЭЭГ осложняется присутствием значительного числа помех и шумов искусственной и физиологической природы, на практике невозможных для четкого разделения по амплитудным или спектральным характеристикам от полезного сигнала, активность которого может наблюдаться во всем анализируемом диапазоне [14–16].

Однако, несмотря на все сложности, одной из наиболее востребованных методик анализа электрической активности головного мозга как человека, так и животных продолжает оставаться исследование частотного спектра искомым сигналам, пришедшее в нейрофизиологию из физического взгляда, интуитивно понятное и активно используемое на практике. Среди хорошо зарекомендовавших себя инструментов спектрального анализа можно отметить непрерывное вейвлетное преобразование (НВП), важной отличительной особен-

ностью которого является то, что данный метод позволяет оценить спектр сигнала в каждый момент времени, а также детектировать энергетическую выраженность колебаний на каждом диапазоне частот [11, 12, 17]. В то же время избыточность информации, получаемой исследователем на базе НВП, не всегда является безусловным бонусом и зачастую может привести к проблеме поиска и детектирования нужных паттернов, несущих полезную информацию, на частотно-временных развертках сигналов.

В данной работе используется новая методика для автоматического детектирования различных частотных паттернов, сосуществующих в единый момент времени на ЭЭГ, достаточно простая для численной реализации и в то же время лишенная недостатков упрощения ЭЭГ-анализа, свойственных энергетическому и скелетонному методам на базе НВП. С использованием данной методики были выявлены изменения в структуре ЭЭГ-записей в области низких частот, возникающие после аудиального воздействия на животное. Показано, что с течением времени изменения в структуре ЭЭГ-данных после аудиального воздействия возвращаются к нормальному состоянию.

Эксперименты на животных проводились в соответствии с национальными и местными этическими принципами, включая Руководство по уходу и использованию лабораторных животных. Использованы данные ЭЭГ пяти крыс (5 интактных фенотипически здоровых крыс-самцов в возрасте 5 месяцев), зарегистрированных в Саратовском государственном университете им. Н.Г. Чернышевского (Саратов, Россия).

Всем крысам имплантировали эпидуральные электроды для хронической записи ЭЭГ при свободном поведении. Сигналы ЭЭГ регистрировались с помощью винтовых электродов, размещенных над лобными областями. В конце периода адаптации после имплантации электродов (10–14 дней) для всех крыс выполнялась первая регистрация ЭЭГ, которая была записана между 14 и 18 часами в течение 1–1,5 часа. Животные находились в свободном состоянии в специальной клетке. Сигнал, полученный во время этой регистрации, обозначается как запись № 1.

Все крысы были подвергнуты слуховой стимуляции для того, чтобы экспериментально повысить проницаемость гематоэнцефалического барьера (ГЭБ) с использованием метода, описанного ранее [18]. На следующий день после первоначальной регистрации ЭЭГ крысы подвергались слуховой стимуляции, состоящей из 60-минутного



громкого звука (110 дБ, 370 Гц) в течение двух часов. Во время звукового воздействия крысы находились в звукоизолированной камере Plexiglas® (объем 2000 см<sup>3</sup>). Сразу после звуковой стимуляции крыс подвергали второй регистрации ЭЭГ в течение 1–1,5 часа. Животные находились в состоянии, аналогичном первой записи. Обозначим эти экспериментальные сигналы как запись № 2. Предполагается [18, 19], что вышеупомянутая звуковая стимуляция может привести к увеличению проницаемости ГЭБ на 30–60 мин. Затем через два дня животным снова проводили контрольную третью регистрацию ЭЭГ в течение 1–1,5 часа в свободном состоянии. Обозначим эти экспериментальные сигналы как запись № 3.

Полученные записи ЭЭГ животных далее были обработаны с использованием методики для автоматического детектирования различных частотных паттернов. В основе данного метода лежит математический аппарат традиционного непрерывного вейвлетного преобразования (НВП) [11, 12, 17]. НВП с комплексным вейвлетным базисом имеет следующий вид:

$$W(s, t) = \sqrt{s} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left( \frac{t-t_0}{s} \right) dt, \quad (1)$$

где  $x(t)$  – анализируемый сигнал,  $s$  – масштаб времени, определяющий ширину вейвлета, \* обозначает комплексное сопряжение, а  $\psi_{t_0, s}(t)$  – материнская вейвлет-функция. В качестве базисной функции используется вейвлет Морле, который является оптимальной функцией для преобразования биологических сигналов:

$$\psi_{t_0, s}(t) = \sqrt{f} \pi^{1/4} e^{j\omega_0 f(t-t_0)} e^{f(t-t_0)^2/2}, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  – параметр масштабирования вейвлета, обеспечивающий связь между временным масштабом вейвлет-преобразования ( $s$ ) и частотой преобразования Фурье ( $f$ ), где  $f = 1/s$ .

Вейвлетная поверхность

$$W(f, t_0) = |W(f, t_0)| e^{j\theta(f, t_0)} \quad (3)$$

характеризует амплитуду сигнала ЭЭГ на частоте  $f$  в момент времени  $t_0$ .

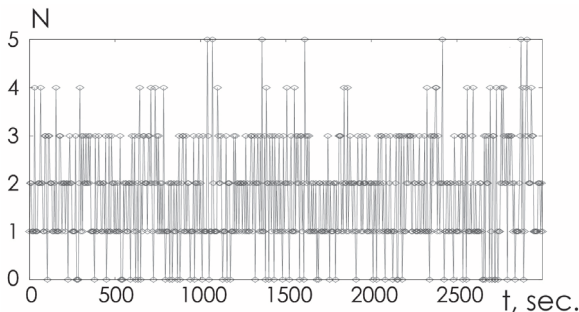


Рис. 1. Временная зависимость количества паттернов  $N$  со средней частотой от 1,0 до 2,5 Гц для крысы #1, запись № 1

Основным отличием используемой методики от стандартного «скелетного» метода [20, 21] является отсутствие ранжирования по значению амплитуды мгновенной энергии НВП для набора частот  $f_k$ , соответствующих экстремумам локаль-

ных максимумов этой зависимости. Еще одним существенным отличием разработанной методики является то, что при анализе учитываются все экстремумы локальных максимумов («скелетоны») в исследуемом частотном диапазоне вне зависимости от их амплитуды, то есть полностью отсутствует ранжирование по величине амплитуды мгновенной энергии НВП. Такое условие введено для выделения отдельных частотных паттернов в исследуемом сигнале и возможности отслеживать эволюцию выделенных частотных паттернов во времени.

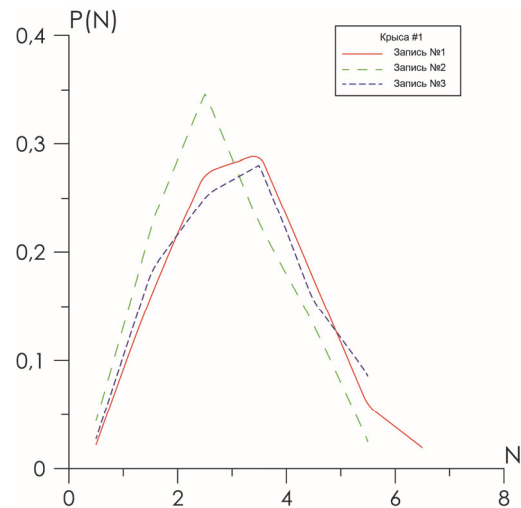


Рис. 2. Вероятностное распределение зависимости количества паттернов  $N$  со средней частотой от 1,0 до 2,5 Гц для всех записей крысы #1

С использованием методики выделения частотных паттернов был проведен анализ электрической активности головного мозга грызунов до и после аудиального воздействия (записи № 1, № 2, № 3) в области низких частот, т.е. анализировались частотные паттерны со средней частотой от 1,0 до 2,5 Гц. При этом все временные реализации были разбиты на временные окна шириной 10 секунд, для каждого временного окна оценивалось среднее количество сосуществующих частотных паттернов со средней частотой от 1,0 до 2,5 Гц по формуле

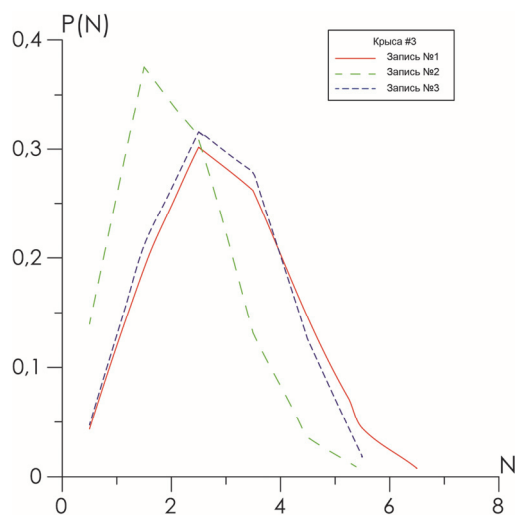
$$N_i = \frac{m}{30}, \quad (4)$$

где  $m$  – общее количество частотных паттернов со средней частотой, лежащей в границах 1,0–2,5 Гц,  $i$  – номер временного окна, в котором осуществляется анализ. Таким образом, для каждой записи была получена временная зависимость количества паттернов. Пример такой зависимости представлен на рис. 1.

Далее, для всех полученных зависимостей  $N_i$  были построены вероятностные распределения, которые позволяют охарактеризовать наиболее типичное количество частотных паттернов для каждой из трех записей электрической активности головного мозга грызунов. На рис. 2 и 3 представлены вероятностные распределения для крыс #1 и #3 соответственно. Стоит отметить, что на данных иллюстрациях хорошо различимы различия



между вероятностными распределениями записей до аудиального воздействия и после. После аудиального воздействия наблюдается снижение количества паттернов в области низких частот, при этом на записи № 3 происходит восстановление количества паттернов в данном частотном диапазоне и различий между записями № 1 и № 2 почти не наблюдается, т.е. можно говорить о том, что структура ЭЭГ вернулась к изначальной состоянию относительно записи № 2, которая выполнялась сразу после аудиального воздействия. Необходимо отметить, что аналогичная ситуация наблюдается для всех проанализированных животных.



**Рис. 3.** Вероятностное распределение зависимости количества паттернов  $N$  со средней частотой от 1,0 до 2,5 Гц для всех записей крысы #3

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации по государственной поддержке молодых российских ученых (проект № МК-2206.2021.1.2) в части адаптации нового подхода для анализа данных. Экспериментальная часть этой работы в области накопления нейрофизиологических данных выполнена в рамках гранта Правительства Российской Федерации № 075-15-2019-1885.

### Литература

1. Ma Y. et al. Classification of motor imagery EEG signals with support vector machines and particle swarm optimization // Computational and mathematical methods in medicine. – 2016. – V. 2016.
2. Hajinorozi M. et al. EEG-based prediction of driver's cognitive performance by deep convolutional neural network // Signal Processing: Image Communication. – 2016. – V. 47. – P. 549–555.
3. Heunis T. et al. Recurrence quantification analysis of resting state EEG signals in autism spectrum disorder—a systematic methodological exploration of technical and

- demographic confounders in the search for biomarkers // BMC medicine. – 2018. – V. 16, № 1. – P. 1–17.
4. Brazier M.A.B. The electrical fields at the surface of the head during sleep // Electroencephalography & Clinical Neurophysiology. – 1949. – V. 1, № 2. – P. 195–204.
5. Sencaj R.W., Aunon J.I. Dipole localization of average and single visual evoked potentials // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 1982. – № 1. – P. 26–33.
6. Lüthi A. Sleep spindles: where they come from, what they do // The Neuroscientist. – 2014. – V. 20, № 3. – P. 243–256.
7. Lin M.H.J. et al. Applying EEG in consumer neuroscience // European Journal of Marketing. – 2018. – V. 52, № 1/2. – P. 66–91.
8. Bell C.J. et al. Control of a humanoid robot by a noninvasive brain–computer interface in humans // Journal of neural engineering. – 2008. – V. 5, № 2. – P. 214.
9. McFarland D.J. et al. Prediction of subjective ratings of emotional pictures by EEG features // Journal of neural engineering. – 2016. – V. 14, № 1. – P. 016009.
10. Maksimenko V.A. et al. Absence seizure control by a brain computer interface // Scientific Reports. – 2017. – V. 7, № 1. – P. 1–8.
11. Hramov A.E. et al. Wavelets in neuroscience. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2015.
12. Pavlov A.N. et al. Wavelet analysis in neurodynamics // Physics-Uspekhi. – 2012. – V. 55, № 9. – P. 845.
13. Gratton G., Coles M.G.H., Donchin E. A new method for off-line removal of ocular artifact // Electroencephalography and clinical neurophysiology. – 1983. – V. 55, № 4. – P. 468–484.
14. Pander T. EEG signal improvement with cascaded filter based on OWA operator // Signal, Image and Video Processing. – 2019. – V. 13, № 6. – P. 1165–1171.
15. Agarwal S. et al. EEG signal enhancement using cascaded S-Golay filter // Biomedical Signal Processing and Control. – 2017. – V. 36. – P. 194–204.
16. Mert A., Akan A. Seizure onset detection based on frequency domain metric of empirical mode decomposition // Signal, Image and Video Processing. – 2018. – V. 12, № 8. – P. 1489–1496.
17. Torresani B. Continuous wavelet transform // Savoie. – Paris, 1995. – V. 675. – P. 676.
18. Semyachkina-Glushkovskaya O. et al. Laser speckle imaging and wavelet analysis of cerebral blood flow associated with the opening of the blood–brain barrier by sound // Chinese Optics Letters. – 2017. – V. 15, № 9. – P. 090002.
19. Pavlov A.N. et al. Characterization of cerebral blood flow dynamics with multiscale entropy // Journal of Innovative Optical Health Sciences. – 2017. – V. 10, № 05. – P. 1743005.
20. Runnova A.E. et al. The study of cognitive processes in the brain EEG during the perception of bistable images using wavelet skeleton // Dynamics and Fluctuations in Biomedical Photonics XIV. – 2017. – V. 10063. – P. 1006319.
21. Maksimenko V.A. et al. Visual perception affected by motivation and alertness controlled by a noninvasive brain–computer interface // PloS one. – 2017. – V. 12, № 12. – P. e0188700.

# Отображение школьной дезадаптации в вариабельности ритма сердца

Л.В. Савчук<sup>1</sup>, С.А. Полевая<sup>1</sup>, К.Н. Громов<sup>1</sup>, А.И. Федотчев<sup>2</sup>, С.Б. Парин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

<sup>2</sup>Институт биофизики клетки РАН, г. Пущино, Московская область

Начало обучения в школе – исключительно важный этап в развитии ребенка. Анализ литературы показывает, что успешность ребенка в обучении зависит как от личностных характеристик, так и от психофизиологической готовности мозга к обучению [1]. Нарушения в нервно-психической (в первую очередь – когнитивной) сфере у детей и подростков сегодня становятся серьезной проблемой во всех развитых странах. В рейтинге причин детской инвалидности в Российской Федерации когнитивные расстройства и расстройства поведения занимают 1-е ранговое место. С 2005 по 2016 г. количество таких детей выросло на 33,5 % [2]. По оценкам физиологов, около 15 % младших школьников проявляют выраженные признаки школьной дезадаптации, выявляющиеся в различных физиологических отклонениях. В связи с острой актуальностью проблемы обучения младших школьников и их адаптации к учебному процессу необходима разработка новых междисциплинарных подходов как при оценке риска и устранения причин школьной дезадаптации, так и при борьбе с ее последствиями [3]. Целью данного исследования является выявление особенностей вегетативного обеспечения адаптационных процессов при школьной дезадаптации.

## Материалы и методы

В соответствии с принципом экологической валидности для выявления специфики адаптационных процессов, связанных с трудностями обучения, разработана экспериментальная модель, позволяющая воспроизвести базовые компоненты познавательной активности. Экспериментальная модель включает 3 функциональных контекста: экстремальную когнитивную нагрузку, оптимальную когнитивную нагрузку, релаксацию.

1. В качестве функциональной пробы, провоцирующей экстремальную когнитивную нагрузку (ФП «напряжение»), применена корректурная проба по тесту Тулуз-Пьерона (рис. 1).

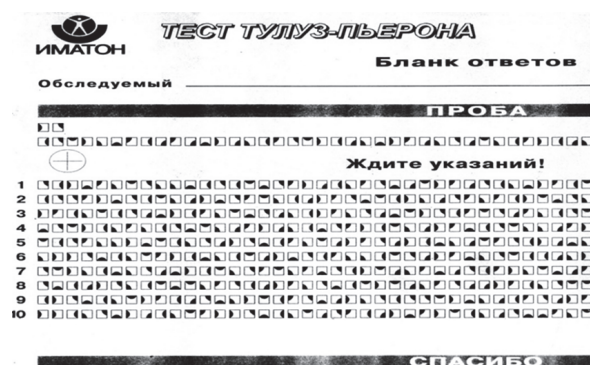


Рис. 1. Бланк теста Тулуз-Пьерона

Суть задания состоит в дифференцировании стимулов, близких по форме и содержанию в течение длительного, точно определенного времени (10 минут). По своему характеру работа с тестом – монотонная деятельность, требующая постоянного напряжения внимания и волевого усилия, при установке на максимальную скорость и точность, соответствующая интенсивной когнитивной нагрузке. Выполнение пробы осуществляется в положении сидя за рабочим столом [4].

2. В качестве функциональной пробы, провоцирующей оптимальную когнитивную нагрузку, было предложено решение сенсомоторных задач разного уровня сложности (ФП «школьная активность»). Данная функциональная проба, на наш взгляд, максимально близка по своему характеру к ежедневной школьной активности и представляет собой последовательность сенсомоторных событий, варьирующихся по сложности.

- Простая сенсомоторная активность – предлагается фиксировать нажатием на кнопку момент появления на экране предметного изображения; в качестве стимулов используются контурные изображения кошки и мыши.

- Сложная сенсомоторная активность в парадигме «GO / NO GO» – предлагается фиксировать нажатием на кнопку момент появления на экране целевого предметного изображения; в качестве стимулов используются контурные изображения кошки и мыши. Целевой стимул – изображение мыши.

- Сложная сенсомоторная активность, содержащая семантический компонент, – предлагается фиксировать нажатием на кнопку момент появления на экране целевого предметного изображения. Целевая функция связана с определением свойств изображаемого объекта. В качестве стимулов используются изображения: рыба, груша, яблоко, крокодил, орел, кот. Целевой стимул – изображения съедобных объектов. Выполнение пробы осуществляется в положении сидя перед монитором компьютера за рабочим столом.

3. В качестве функциональной пробы, провоцирующей релаксацию, проводилась процедура нейробиоуправления (НБУ) (ФП «расслабление»). Когнитивная активность отсутствует; испытуемый находится в положении лежа с закрытыми глазами; посредством наушников и очков со встроенными светодиодами осуществляется световая и звуковая стимуляция, направленная на формирование «альфа-состояния», которое характеризуется общей релаксацией со снижением уровня стресса, тревожности и депрессии [5]. Параметры стимуляции: сеансы НБУ заключались в предъявлении испытуемым светодиодных стимулов с час-

той, постепенно увеличивающейся от 4 до 20 Гц для резонансного обнаружения осцилляторов ЭЭГ. Затем зарегистрированная в режиме онлайн амплитуда осциллятора ЭЭГ испытуемого автоматически преобразовывалась в музыкальные сигналы, напоминающие звуки флейты, с плавными изменениями высоты тона и интенсивности. Эти музыкальные стимулы на основе ЭЭГ дополнялись слабыми слуховыми сигналами, соответствующими частоте сердечных сокращений испытуемого. Одновременно предъявлялись светодинамические стимулы, созданные на основе собственной ЭЭГ испытуемого [6].

На базе технологии событийно-связанной телеметрии ритма сердца проведена оценка вегетативной регуляции, связанной с каждой из функциональных проб [7]. Для определения особенностей вегетативного обеспечения адаптационных процессов при школьной дезадаптации проведен сравнительный анализ показателей variability ритма сердца в трех группах, а основанием для распределения по группам служили значения показателей скорости (V) и точности (K) по тесту Тулуз-Пьерона, попадающие нормативно:

- в зону ниже нормы, но не в зону патологии,
- в зону патологии (наличие ММД),
- в возрастную норму или выше нормы.

Таким образом, выборка была разделена на три части: группа «ММД по тесту Тулуз-Пьерона», группа «ниже нормы по тесту Тулуз-Пьерона» и группа «норма по тесту Тулуз-Пьерона». Режим вегетативной регуляции, связанный с каждой функциональной пробой, определялся по спектральным показателям ВРС: TP ( $\text{мс}^2/\text{Гц}$ ) – активность центрального контура управления ритмом сердца и адаптационный потенциал; HF ( $\text{мс}^2/\text{Гц}$ ) – активность парасимпатической нервной системы; LF ( $\text{мс}^2/\text{Гц}$ ) – активность симпатической нервной системы; ИВБ – индекс вегетативного баланса, характеризующий напряжение регуляторных систем.

Для выявления особенностей тону вегетативной нервной системы при переключении функциональных проб возникла необходимость в стандартизации показателя ИВБ. В качестве способа нормировки для адекватного цифрового отображения показателя симпатовагусного баланса был применен натуральный логарифм, который позволил осуществить преобразование, при котором одна и та же степень доминирования отображается одним и тем же значением числа, а направление доминирования знаком числа. Это позволило отобразить все возможные варианты динамики показателя в прямоугольной системе координат (рис. 2).

- Точки внутри координатного угла I имеют положительные абсциссы и ординаты и соответствуют симпатотоническому вегетативному тону на фоне обеих функциональных проб.
- Точки внутри координатного угла II имеют отрицательные абсциссы и положительные

ординаты и соответствуют ваготоническому вегетативному тону на фоне пробы «напряжение» и симпатотоническому вегетативному тону на фоне пробы «расслабление».

• Точки внутри координатного угла III имеют отрицательные абсциссы и ординаты и соответствуют ваготоническому вегетативному тону на фоне обеих проб.

• Точки внутри координатного угла IV имеют положительные абсциссы и отрицательные ординаты и соответствуют симпатотоническому вегетативному тону на фоне пробы «напряжение» и ваготоническому вегетативному тону на фоне пробы «расслабление».

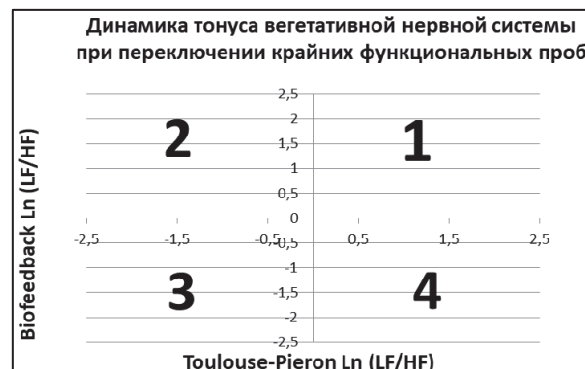


Рис. 2. Цифровое отображение показателя симпатовагусного баланса при переключении крайних функциональных проб

### Результаты

Выявлено, что не все испытуемые, имеющие предварительный диагноз на основании клинической оценки, попали в группу «ММД» или «ниже нормы» по тесту Тулуз-Пьерона, в то время как вся группа контроля попала в «норму» (рис. 3).

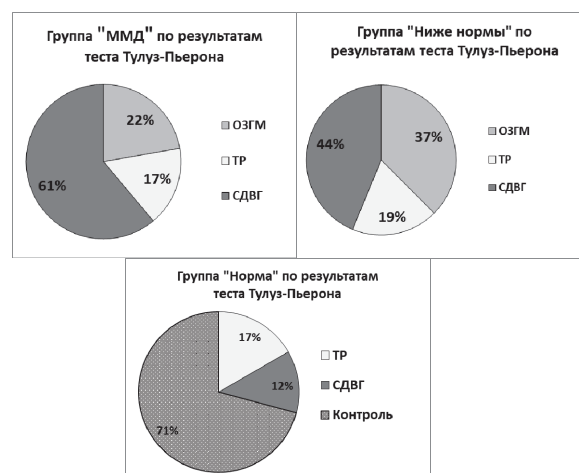
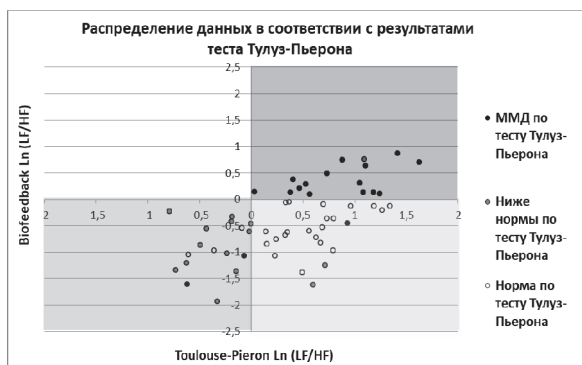


Рис. 3. Распределение данных по группам в процентах

Выявлены особенности тону вегетативной нервной системы при переключении крайних функциональных проб с учетом распределения испытуемых в соответствии с результатами по тесту Тулуз-Пьерона (группы «ММД по тесту Тулуз-Пьерона» и «норма по тесту Тулуз-Пьерона»).



**Рис. 4.** Распределение данных в соответствии с динамикой ИВБ при переключении функциональных проб «напряжение»/«расслабление» по группам

Группе «норма по тесту Тулуз-Пьерона» соответствует 4-й тип динамики ИВБ, когда симпатотония на фоне пробы «напряжение» сменяется ваготонией на фоне пробы «расслабление».

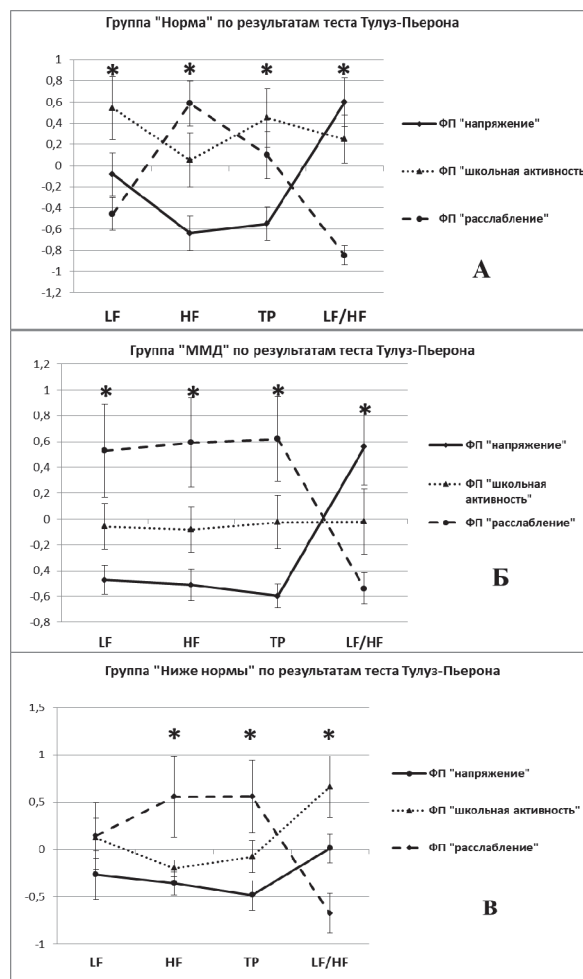
В группе «ниже нормы по тесту Тулуз-Пьерона» при переключении крайних функциональных проб наблюдается ваготония как на фоне пробы «напряжение», так и на фоне пробы «расслабление».

Группе «ММД» соответствует вариант динамики тонуса вегетативного баланса по 1-му типу, когда симпатотонический вегетативный тонус наблюдается на фоне обеих функциональных проб.

Анализ динамики параметров variability ритма сердца и вегетативной регуляции в группах «ММД по тесту Тулуз-Пьерона», «ниже нормы по тесту Тулуз-Пьерона» и «норма по тесту Тулуз-Пьерона» при переключении трех функциональных проб «напряжение», «школьная активность» и «расслабление» выявил особенности вегетативного ответа в каждой из групп.

В группе «норма по тесту Тулуз-Пьерона» значения всех показателей в трех функциональных пробах достоверно отличаются друг от друга, что свидетельствует о разном ответе регуляторных систем на уровень нагрузки при переключении функциональных проб. На фоне пробы «напряжение» наблюдается минимальное значение показателя общей мощности спектра variability ритма сердца и повышение уровня напряжения регуляторных систем с доминированием симпатического звена ВНС, без выраженной редукции центрального контура регуляции. На фоне пробы «школьная активность», где отдых чередуется с выполнением заданий разного уровня сложности, закономерно наблюдается средний уровень напряжения регуляторных систем, рост значений спектральных показателей в диапазонах LF и HF и максимальное значение общей мощности спектра variability ритма сердца. На фоне пробы «расслабление» происходит существенное снижение уровня напряжения, доминирует парасимпатическое звено ВНС, а значение общей мощности спектра variability ритма сердца находится на среднем уровне (рис. 5, А).

В группе «ММД по тесту Тулуз-Пьерона» значения всех показателей в трех функциональных



**Рис. 5.** Стандартизованные значения спектральных показателей в диапазонах LF – 0,04–0,15 Гц и HF – 0,15–0,4 Гц, общей мощности спектра variability ритма сердца TP и индекса вегетативного баланса LF/HF в группе «норма» (А), «ММД» (Б), «ниже нормы» (В) по тесту Тулуз-Пьерона. Звездочками отмечены достоверные различия между ФП «напряжение», «школьная активность» и «расслабление» ( $p < 0,05$ )

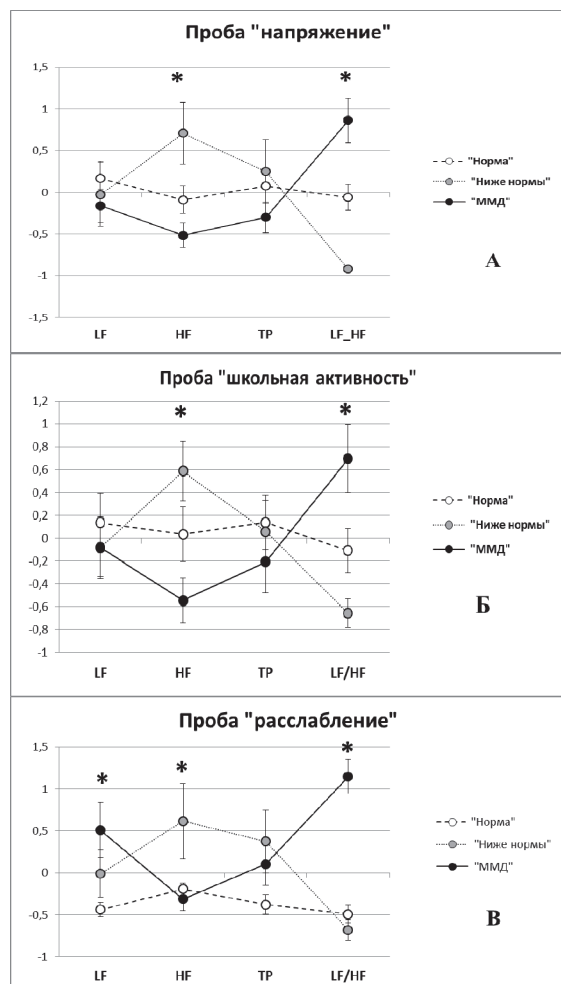
пробах также достоверно отличаются друг от друга. На фоне пробы «напряжение» наблюдается максимальное снижение общей мощности спектра variability ритма сердца, редукция центрального контура регуляции и повышение уровня напряжения регуляторных систем с доминированием симпатического звена ВНС. По мере снижения нагрузки в функциональных пробах «школьная активность» и «расслабление» происходит рост общей мощности спектра variability ритма сердца и снижение уровня напряжения, однако даже в положении лежа (ФП «расслабление») доминирует симпатическое звено ВНС, а уровень напряжения регуляторных систем остается высоким (рис. 5, Б).

В группе «ниже нормы по тесту Тулуз-Пьерона» значения всех показателей, кроме LF, при переключении трех функциональных проб, достоверно отличаются друг от друга. Ваготония наблюдается на фоне всех функциональных проб, по мере снижения нагрузки в функциональных пробах происходит рост общей мощности спектра



вариабельности ритма сердца, максимальный уровень напряжения наблюдается в ФП «школьная активность», что может быть связано с трудностями переключения между задачами (рис. 5, В).

Межгрупповой анализ динамики параметров вариабельности ритма сердца и вегетативной регуляции в каждой отдельной пробе «напряжение», «школьная активность» и «расслабление» выявил особенности вегетативного ответа на разные типы нагрузки в соответствии с уровнем внимания и активности (рис. 6, А, Б, В).



**Рис. 6.** Стандартизованные значения спектральных показателей в диапазонах LF – 0,04–0,15 Гц и HF – 0,15–0,4 Гц, общей мощности спектра вариабельности ритма сердца TP и индекса вегетативного баланса LF/HF в ФП «напряжение» (А), «школьная активность» (Б), «расслабление» (В) по группам. Звездочками отмечены достоверные различия ( $p < 0,05$ )

На фоне всех функциональных проб в группах, имеющих слабый и патологически низкий уровень внимания и активности, наблюдаются противоположные состояния психофизиологической системы, напрямую связанные с качеством вагусной активности, и если в первом случае результатом является недостаточная активация, то во втором случае – избыточное напряжение (рис. 6, А, Б). При этом вегетативный профиль почти не меняется и остается ригидным в ответ на изменение уровня нагрузки, при этом ФП «напряжение» и «школьная активность» в равной мере

информативны и выявляют особенности вегетативного ответа в этих группах. В группе «норма по тесту Тулуз-Пьерона» наблюдается закономерное изменение параметров вариабельности ритма сердца и вегетативной регуляции в ответ на снижение уровня нагрузки.

## Заключение

Разработанная экспериментальная модель, воспроизводящая базовые компоненты познавательной активности, проявила особенности вегетативного ответа на разные типы нагрузки у детей с признаками школьной дезадаптации. Характер вегетативного ответа на изменение уровня нагрузки не связан напрямую с клиническим статусом, а находится в соответствии с уровнем внимания и активности. На фоне всех функциональных проб в группах, имеющих слабый и патологически низкий уровень активности и внимания, наблюдаются противоположные состояния психофизиологической системы; в первом случае результатом является недостаточная активация, во втором случае – избыточное напряжение. Предложенный в исследовании набор сенсомоторных задач разного уровня сложности может быть использован как скрининговый инструмент для дистанционной оценки рисков наличия признаков школьной дезадаптации.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты № 18-013-01225\_а, 18-413-520006\_р\_а, 19-013-00095\_а и 0729-2020-0062.

## Литература

1. Ефимова В.Л. Психофизиологический подход к анализу механизмов возникновения трудностей в обучении у детей: (обзор зарубежных источников) // Психология образования в поликультурном пространстве. 2020. Т. 2(50). С. 28–39.
2. Мальцев С.В., Сафина Л.З., Биктимирова А.А., Мансурова Г.Ш. Состояние здоровья школьников – медицинские и социальные проблемы // Практическая медицина. 2019. Т. 17(5). С. 8–15.
3. Баландина О.В., Божкова Е.Д., Дворянинова В.В., Катунова В.В., Коновалов А.А. Коррекция школьной дезадаптации на основе междисциплинарного подхода // Медицинский альманах. 2019. Т. 2(59). С. 24–29.
4. Ясюкова Л.А. Прогноз и профилактика проблем обучения в начальной школе. СПб.: ИМАТОН, 2006. 204 с.
5. Frederick J.A. Psychophysics of EEG alpha state discrimination // Conscious Cogn. 2012. V. 21(3). P. 1345–1354.
6. Федотчев А.И., Земляная А.А., Полевая С.А., Савчук Л.В. Синдром дефицита внимания с гиперактивностью и современные возможности его лечения методом нейробиоуправления // Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2016. Т. 116(5). С. 98–101.
7. Полевая С.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А., Бахчина А.В., Ковальчук А.В., Парин С.Б. Событийно-связанная телеметрия ритма сердца для персонализированного дистанционного мониторинга когнитивных функций и стресса в условиях естественной деятельности // Современные технологии в медицине. 2019. Т. 11(1). С. 109–115.

# Влияние индуцированной когнитивной нагрузки на эффективность оценки достоверности сообщаемой информации

Е.И. Селезнева<sup>1</sup>, Е.А. Тихомирова<sup>2</sup>

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

<sup>1</sup>email: ekaterina.selezneva.1996@yandex.ru

<sup>2</sup>email: ekaterinann2012@yandex.ru

## Введение

Весьма актуальной в настоящее время представляется потребность в повышении эффективности мероприятий по выявлению умышленного сокрытия информации, достоверность которой традиционно оценивается с помощью полиграфа – технического средства, классифицирующего значимость воздействующих на испытуемого стимулов путем измерения совокупности вегетативных физиологических изменений, которые вызваны той или иной эмоцией человека.

В современных исследованиях рассматривается возможность применения стимульного материала, индуцирующего когнитивную нагрузку, вместо контрольных вопросов, используемых в полиграфологическом тестировании. Данные предложения основываются на гипотезе, что ложь требует больших когнитивных усилий, чем правдивый ответ, что выражается в более длительном времени реакции, увеличенном диаметре зрачка, более низкой частоте моргания и других признаках повышенной когнитивной нагрузки [1].

Для оценки нового подхода чаще всего используется технология айтрекинг, преимущества которой перед полиграфом определяется тем, что окуломоторные реакции можно регистрировать без взаимодействия экспериментатора и испытуемого – дистантно, на исследование требуется в 5 раз меньше времени, а процедура оценки представляется более комфортной для респондента. Глазодвигательная активность является необходимым элементом психических процессов, связанных с получением, преобразованием и использованием сенсорного зрительного сигнала, а также состояний, деятельности и общения человека, именно поэтому регистрация и анализ движений глаз открывает доступ к внутренним формам активности, протекающим быстро и неосознанно.

Еще одним перспективным методом для оценки достоверности сообщаемой информации может быть технология событийно-связанной телеметрии ритма сердца, возможности которой изучаются в рамках настоящего исследования.

Таким образом, данная работа развивает исследования [2, 4] и апробирует новый подход к детекции лжи, предполагающий уход от навязанных и закрытых вопросов путем побуждений к свободному описательному интервьюированию.

## Постановка задачи и описание исследования

На основе двух экспериментов с использованием айтрекера было установлено, что выбор ложного ответа отражает процесс решения допол-

нительной мыслительной задачи, вследствие чего скрывающий что-либо человек, вероятнее всего, будет демонстрировать увеличенный диаметр зрачка, медленнее читать и отвечать на вопросы, а также реже моргать при чтении значимых вопросов [2].

Однако известно, что расширение зрачков, урежение частоты моргания и другие показатели обмана отражают не только когнитивную нагрузку, но и эмоциональные реакции [3]. Свободное когнитивное интервью может вызывать у испытуемых не только когнитивную нагрузку, но и тревогу. Поэтому корейским ученым Ara Cho с соавторами из Chung Ang University было проведено исследование, доказавшее, что когнитивные процессы в большей степени по сравнению с аффективными влияют на изменение диаметра зрачка [4]. Данное исследование продолжает предшествующие с целью дифференциации влияния эмоционального возбуждения и когнитивной нагрузки на информационные маркеры лжи, а также для проверки гипотез на другой культурной группе.

В исследовании включена также технология событийно-связанной телеметрии, обеспечивающая непрерывный мониторинг и анализ динамики вариабельности ритма сердца (ВРС) с учетом событийного контекста [5–8]. ВРС – общепринятый термин для описания изменений мгновенной частоты сердечных сокращений и RR-интервалов. Анализ динамики ВРС позволит изучить в том числе перцептивные процессы, поскольку сердце играет важную роль в модуляции таких когнитивных функций, как сенсомоторная и перцептивная деятельность, а сердечная модуляция коры обусловлена афферентными входами на нейронах таламуса, где синхронизируется работа всей коры. Так, например, с возрастанием уровня сложности когнитивной нагрузки снижается степень выраженности в динамике сердечного ритма вазомоторных компонент, за счет чего снижается общая вариабельность сердечного ритма [9], что показано, в частности, при работе с субъективно сложным учебным материалом [10]. Предполагается, что лица, сообщаящие заведомо ложную или искаженную информацию, будут демонстрировать более низкие значения RR-интервалов, что будет отражением более высокой когнитивной нагрузки. Таким образом, анализ ВРС может использоваться для изучения вегетативного обеспечения процесса сознательного сокрытия информации.

*Цель исследования:* изучить особенности влияния индуцированной когнитивной нагрузки на динамику диаметра зрачка и ритма сердца при сообщении заведомо ложной информации.

*Общая гипотеза исследования:* индуцированная когнитивная нагрузка влияет на диаметр зрачка и ритм сердца при сообщении правдивой и заведомо ложной информации.

*Частные гипотезы исследования:*

1. Предъявление вопросов с когнитивной нагрузкой будет приводить к значимому увеличению диаметра зрачка у испытуемых, сообщающих заведомо ложную информацию, в сравнении с вопросами эмоционально-возбуждающими.

2. Ответы на вопросы с когнитивной нагрузкой будут приводить к значимому сокращению RR-интервалов у испытуемых, сообщающих заведомо ложную информацию, в сравнении с вопросами эмоционально-возбуждающими.

3. При ответе на вопросы с когнитивной нагрузкой у испытуемых, сообщающих заведомо ложную информацию, будет наблюдаться большее увеличение диаметра зрачка, чем у испытуемых, сообщающих правду.

4. У испытуемых, сообщающих заведомо ложную информацию, будет наблюдаться более низкие значения RR-интервалов при ответе на вопросы с когнитивной нагрузкой в сравнении с испытуемыми, сообщающими правду.

*Задачи исследования:*

1. Провести апробацию метода айтрекинг в сочетании с событийно-связанной телеметрией ритма сердца для детектирования лжи.

2. Проанализировать влияние индуцированной когнитивной нагрузки на значения RR-интервалов при проведении детектирологического исследования.

3. Проанализировать влияние индуцированной когнитивной нагрузки на окулomotorные реакции при проведении детектирологического исследования.

*Дизайн исследования*

В эксперименте выборка людей случайным образом делится на две равные группы. Первой группе (условно «невиновной») дается задание пойти в указанную аудиторию (первую комнату) и сделать ее снимок на мобильный телефон каждого из участников. Второй группе (условно «виновной») дается то же задание, после чего они должны взять купюру (номинал 5000 р.), вложенную в указанную книгу, положить к себе в сумку, рюкзак или карман и в дальнейшем не признаваться в содеянной краже экспериментатору (экспериментатор не осведомлен о распределении участников по группам). Задание выполняется каждым испытуемым отдельно: в комнату заходит только один человек, выполняет данные указания, после чего в случае со второй группой в книгу вкладывается новая купюра. Затем на испытуемого надевается датчик, регистрирующий показатели variability сердечного ритма, и портативный айтрекер. После подключения и настройки оборудования испытуемого просят отвечать на поставленные вопросы, подразделенные на три блока: эмоционально-возбуждающие вопросы, вопросы с когнитивной нагрузкой и нейтральные вопросы. Перечень вопросов, входящих в каждый из блоков, представлен в таблице 1.

После интервью, отключения и снятия оборудования эксперимент завершается.

*Исследовательская база и описание выборки исследования*

В исследовании приняли участие 30 человек (4 мужчин и 26 женщин) в возрасте 20–59 лет.

Испытуемые проживают в разных регионах Европейской части России и являются студентами 1–5 курсов (бакалавриата, магистратуры, специалитета и аспирантуры), преподавателями и сотрудниками ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Характеристика выборки испытуемых на основе мер центральной тенденции и изменчивости представлена в таблице 2.

*Описание методик исследования*

Для эмпирического исследования особенностей динамики комплекса психофизиологических показателей при сообщении заведомо ложной информации были выбраны следующие психофизиологические методы (методики):

- айтрекинг (регистрация динамики изменений диаметра зрачка),
- событийно-связанная телеметрия ритма сердца (анализ variability ритма сердца).

*Оборудование:* датчик Zephyr с зарядным устройством, портативный айтрекер SMI Eye Tracking Glasses.

*Анализ данных*

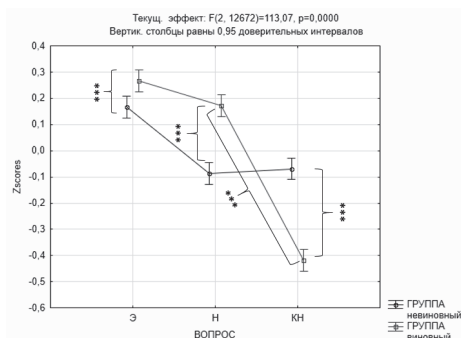
Полученные в ходе эксперимента данные показателей диаметра зрачка и RR-интервалов преобразуются методом Z-Score (стандартизированной оценки) с целью нивелирования индивидуальных физиологических особенностей испытуемых и приведения данных к сопоставимому виду.

Для дальнейшей обработки результатов измерения и проверки гипотез исследования применяется программа Statistica 10.0.

Исследование влияния группы факторов, таких как принадлежность к группе «виновных»/«невиновных» и тип задаваемых вопросов, на зависимую переменную – диаметр зрачка и RR-интервалы – осуществляется методом многофакторного дисперсионного анализа.

## Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены средние значения RR-интервалов в разных группах и контекстах. Э – эмоционально значимые вопросы, Н – нейтральные вопросы, КН – когнитивные вопросы



**Рис. 1.** Средние значения RR-интервалов в разных группах и контекстах (Э – эмоционально значимые вопросы, Н – нейтральные вопросы, КН – когнитивные вопросы)

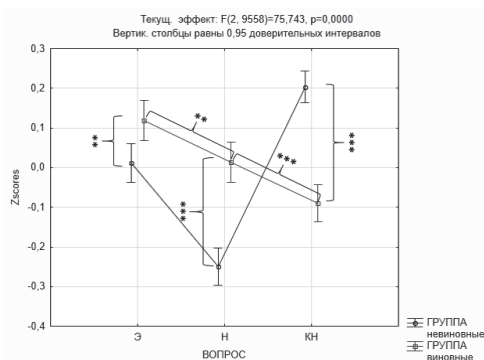


Группа «виновных» демонстрирует значимо более низкие значения RR-интервалов при когнитивных вопросах, что указывает на пребывание в состоянии большего напряжения из-за необходимости конструирования лжи.

У группы «невиновных» более низкие значения RR-интервалов наблюдаются при эмоционально значимых и нейтральных вопросах в сравнении с группой «виновных». В то же время у них не обнаружено значимых отличий в значениях при когнитивных и нейтральных вопросах.

Уровни значимости указанных различий представлены в таблице 3.

На рисунке 2 представлены средние значения диаметра зрачка в разных группах и контекстах.



**Рис. 2.** Средние значения диаметра зрачка в разных группах и контекстах (Э – эмоционально значимые вопросы, Н – нейтральные вопросы, КН – когнитивные вопросы)

По рисунку 2 можно заметить, что вопреки гипотезе исследования в когнитивном контексте «виновные» участники продемонстрировали значимое снижение диаметра зрачка в сравнении с эмоциональным и нейтральным контекстом, в то время как у испытуемых, сообщающих правдивую информацию, напротив, обнаружилось значимое увеличение диаметра зрачка при когнитивных вопросах. Эти данные не согласуются с предыдущими исследованиями и требуют дальнейших уточнений. В дальнейших исследованиях требуется введение дополнительного фактора времени, для того чтобы точно выделить временные промежутки ответов испытуемых.

При эмоциональных и нейтральных вопросах у испытуемых, сообщающих заведомо ложную информацию, обнаружилось значимое увеличение диаметра зрачка в сравнении с «невиновными» испытуемыми, причем в эмоциональном контексте значения диаметра значимо выше, чем в нейтральном.

Уровни значимости указанных различий представлены в таблице 4.

Таким образом, гипотеза исследования подтверждена лишь частично: в когнитивном контексте действительно обнаружено значимое снижение значений RR-интервалов у лиц, сообщающих заведомо ложную информацию, в сравнении с правдивыми испытуемыми, однако зрачок значимо сужается при когнитивных вопросах и расширяется при эмоционально-возбуждающих.

## Выводы

1. Проведенное исследование подтвердило возможность применения в области детектирования лжи технологии событийно-связанной телеметрии ритма сердца.

2. Высокая дифференцирующая способность когнитивной нагрузки подтверждается значимым снижением длительности RR-интервалов в группе «лжецов» при внутригрупповом и межгрупповом сравнении разных контекстов.

3. Дополнительного изучения требует значимое снижение диаметра зрачка в когнитивном контексте, противоречащее результатам предшествующих исследований.

4. В дальнейшем планируется включение в программу исследования анализа динамических изменений электрической активности мозга – электроэнцефалографии (ЭЭГ) и когнитивных вызванных потенциалов (КВП), количественное и качественное увеличение выборки испытуемых, а также введение дополнительного фактора времени для точного выделения временных промежутков ответов испытуемых.

## Литература

1. *Walczyk J.J. et al.* Advancing lie detection by inducing cognitive load on liars: a review of relevant theories and techniques guided by lessons from polygraph-based approaches // *Frontiers in Psychology*. 2013. V. 4. P. 14.
2. *Cook A.E. et al.* Lying Eyes: Ocular-motor Measures of Reading Reveal Deception // *Experimental Psychology*. 2012. № 18(3). P. 301–313.
3. *DePaulo B.M. et al.* Lying in everyday life // *J. Pers. Soc. Psychol.* 1996. V. 70, № 5. P. 979.
4. *Cho B.A.A., Lee J.H.A.* Comparison of Cognitive Load and Emotional Arousal on Liar's Pupil Diameter Changes // *International Journal of Psychophysiology*. 2018. V. 131. P. S74.
5. *Еремин Е.В., Кожевников В.В., Полевая С.А., Бахчина А.В.* Вебсервис для визуализации и хранения результатов измерения сердечного ритма : свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621202; опублик. 26.08.2014.
6. *Кожевников В.В., Полевая С.А., Шишалов И.С., Бахчина А.В.* Мобильный HR-измеритель (HR-измеритель) : свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2014618634; опублик. 26.08.2014.
7. *Полевая С.А., Парин С.Б., Бахчина А.В., Некрасова М.М., Шишалов И.С., Рунова Е.В., Кожевников В.В.* Система определения функционального состояния группы людей: патент РФ на полезную модель № 129680; опублик. 27.06.2013.
8. *Полевая С.А., Парин С.Б., Бахчина А.В., Некрасова М.М., Шишалов И.С., Рунова Е.В., Кожевников В.В.* Система определения функционального состояния группы людей с обратной связью: патент РФ на полезную модель № 129681; опублик. 27.06.2013.
9. *McCraty R., Shaffer F.* Heart Rate Variability: New Perspectives on Physiological Mechanisms, Assessment of Self-regulatory Capacity and Health risk // *Glob. Adv. Health Med.* 2015. V. 4, № 1. P. 46–61.
10. *Demareva V.A., Bovykina D.V., Edeleva Yu.A.* Autonomic Factors of Successful Foreign Language Acquisition by Students and Schoolchildren. *Sovremennye tehnologii v medicine*. 2019. V. 11(1). P. 177–183.

Таблица 1

## Список вопросов, задаваемых испытуемым во время исследования

№	Вопрос	Название блока
1	Вы пришли сюда, чтобы лгать?	Эмоционально-возбуждающие вопросы
2	Я слышала, что пропали деньги, они у вас?	
3	Вы лжете мне сейчас?	
4	Какая у вас специальность?	Нейтральные вопросы
5	Вам нравится ваша специальность?	
6	Почему вы выбрали эту специальность?	
7	Пожалуйста, опишите происходившее в первой комнате в хронологическом порядке	Вопросы с когнитивной нагрузкой
8	Пожалуйста, расскажите мне то же самое еще раз, но в обратном порядке	
9	Пожалуйста, опишите первую комнату	

Таблица 2

## Характеристика выборки испытуемых

N		M среднее значение	Mo мода	Me медиана	Sd стандартное отклонение
Мужчины	Женщины				
4	26	27,1	24	25	7,7
30					

Таблица 3

Достоверность отличий RR-интервалов между «виновными» и «невиновными» испытуемыми при ответе на когнитивные, нейтральные и эмоционально значимые вопросы  
(Э – эмоционально значимые вопросы, Н – нейтральные вопросы, КН – когнитивные вопросы)

	Группа	Вопрос	1	2	3	4	5	6
			Э	Н	КН	Э	Н	КН
1	«невиновные»	Э		0,00	0,00	0,00	0,82	0,00
2	«невиновные»	Н	0,00		0,56	0,00	0,00	0,00
3	«невиновные»	КН	0,00	0,56		0,00	0,00	0,00
4	«виновные»	Э	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
5	«виновные»	Н	0,82	0,00	0,00	0,00		0,00
6	«виновные»	КН	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Таблица 4

Достоверность отличий в диаметре зрачка между «виновными» и «невиновными» испытуемыми при ответе на когнитивные, нейтральные и эмоционально значимые вопросы  
(Э – эмоционально значимые вопросы, Н – нейтральные вопросы, КН – когнитивные вопросы)

	Группа	Вопрос	1	2	3	4	5	6
			Э	Н	КН	Э	Н	КН
1	«невиновные»	Э		0,00	0,00	0,00	0,96	0,00
2	«невиновные»	Н	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00
3	«невиновные»	КН	0,00	0,00		0,07	0,00	0,00
4	«виновные»	Э	0,00	0,00	0,07		0,01	0,00
5	«виновные»	Н	0,96	0,00	0,00	0,01		0,00
6	«виновные»	КН	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

# Исследование когнитивных вызванных потенциалов в процессе длительной когнитивной нагрузки

А.О. Сельский<sup>1,2</sup>, М.О. Журавлёв<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
email: selskiiao@gmail.com

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского  
email: anefila@gmail.com

Исследование мозга человека является одной из важнейших задач современной науки. Однако для успешного изучения мозговой активности необходим как эффективный метод измерения активности, так и соответствующий конкретной задаче численный метод. В настоящее время существует большое число методов, позволяющих оценить и измерить активность отделов головного мозга человека, например энцефалограммы (ЭЭГ, МЭГ), фМРТ и компьютерная томография [1]. Каждый метод наилучшим образом подходит для определенного круга задач. В работе была использована электроэнцефалограмма, так как этот метод прост в использовании, является неинвазивным и недорогостоящим по сравнению с остальными. При этом пространственного и временного разрешения ЭЭГ хватает для задачи исследования вызванных потенциалов (ВП) и выделения по ним индивидуальных психофизиологических особенностей [2]. После получения записи ЭЭГ-данных в ходе эксперимента их необходимо обработать с помощью одного из математических методов, число которых в настоящий момент весьма велико [3, 4]. В настоящей статье анализ ЭЭГ-данных осуществлялся с помощью построения когнитивных ВП [2, 5]. Данный метод часто применяется для анализа ЭЭГ-данных экспериментов, в ходе которых испытуемый выполняет повторяющиеся задачи, требующие внимания или когнитивной деятельности. Помимо фундаментального исследования когнитивных механизмов человеческого мозга, ВП перспективны при создании систем «brain-computer interface» (BCI), применяемых для обучения или реабилитации пациентов с различными заболеваниями. Именно при таком практическом применении чрезвычайно важным оказывается учет индивидуальных особенностей испытуемого. Когнитивные вызванные потенциалы, как известно, отличаются наличием хорошо выраженного компонента P(300) [6]. Данный компонент присутствует в вызванных потенциалах при решении когнитивных задач и устойчиво наблюдается в довольно узком интервале времени после предъявления стимула. Однако несмотря на устойчивость индивидуальные особенности (особенно при сильном угнетении когнитивных способностей) могут приводить к существенному изменению наблюдаемых вызванных потенциалов, что необходимо учитывать при настройке системы BCI.

В настоящей работе исследуется вопрос выделения индивидуальных особенностей у испытуемых с хроническими болями (мигрень), при кото-

рых угнетение когнитивных способностей проявляется особенно сильно. Для этого после автоматического выделения компонент вызванного потенциала (максимумов и минимумов) будет показано несколько типовых групп по индивидуальным особенностям детектирования вызванных потенциалов.

Общая методика нахождения вызванных потенциалов хорошо известна [5]. В случае если испытуемому предъявляют серию стимулов, то за каждым стимулом следует ответная реакция на стимул в ЭЭГ-канале. Из-за изменчивости сигнала вызванный потенциал по одному стимулу дает мало информации, поэтому вызванные потенциалы для идентичных стимулов усредняются. Для этого важно знать окончание предъявления стимулов, иначе усреднение даст смещенную картину. Если расчет вызванных потенциалов выполнен верно, то после предъявления стимула наблюдается серия экстремумов (называемых компонентами вызванного потенциала), тогда как случайные составляющие ЭЭГ-сигнала, не имеющие отношения к ответу на данный стимул, после усреднения близки к нулю. Для разных стимулов вызванные потенциалы имеют разную форму. На рисунке 1 продемонстрировано несколько когнитивных вызванных потенциалов для одного из испытуемых, построенные по паре каналов.

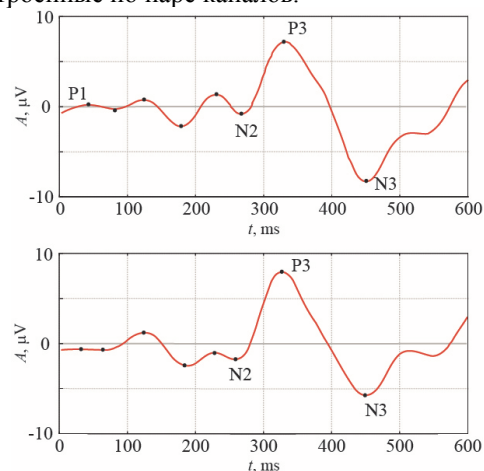


Рис. 1. Примеры вызванных потенциалов для двух каналов одного из испытуемых. Точками нанесены экстремумы вызванного потенциала. Обозначены выделенные вручную компоненты

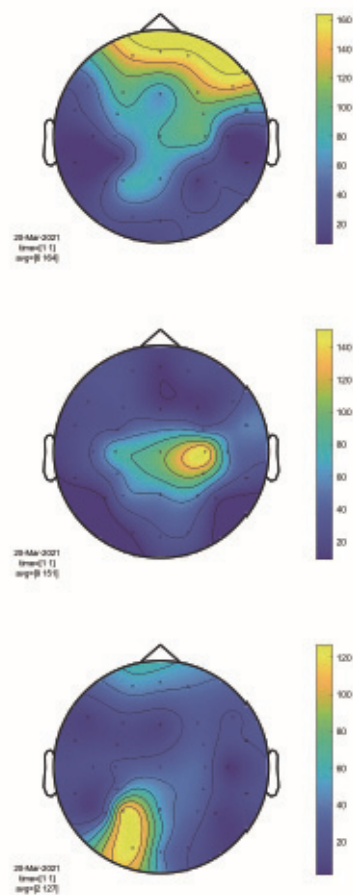
Хорошо видно, что для данных вызванных потенциалов очень четко выделяются компоненты N2, P3, N3, тогда как другие компоненты менее выражены. Такое распределение очень характерно для когнитивных вызванных потенциалов.

Основными характеристиками компонент вызванного потенциала выступают их амплитуда и время, при котором они наблюдаются. В данной статье мы сосредоточимся на амплитудах компонент вызванного потенциала и возможности выделить по ним индивидуальные особенности испытуемых. Как видно из рисунка 1, основными компонентами когнитивного вызванного потенциала являются компоненты N2, P3, N3. Они имеют наибольшую амплитуду, почти всегда наблюдаются на характерных для себя временах, удобны для распознавания. Для того чтобы оценивать одновременно амплитуды всех трех потенциалов, введем параметр магнитуды  $M$  характерных компонент когнитивного вызванного потенциала. Этот параметр равен сумме модулей разностей компонент N2 – P3 и N3 – P3. Если одна или несколько компонент не были выявлены для данного вызванного потенциала, то их амплитуда считалась равной нулю и формула расчета параметра  $M$  при этом не изменялась.

Рассчитав параметры  $M$  для всех каналов каждого испытуемого, можно построить распределение параметра  $M$  по каналам. Для удобства такие картинки были построены на схеме головы, как показано на рисунке 2. На этом рисунке приведены распределения параметра магнитуды  $M$  характерных компонент когнитивного вызванного потенциала по каналам для трех испытуемых, демонстрирующих различные индивидуальные особенности. Видно, что для всех испытуемых максимальное значение параметра  $M$  приходится на центральные каналы, смещение в сторону левых или правых каналов не очень частое и не сильно выраженное. Это еще одна характерная черта когнитивных вызванных потенциалов.

При этом положение максимального значения параметра  $M$  варьируется вдоль центральной оси. Может быть в лобной или затылочной долях либо же между ними, вблизи моторной коры. В настоящем эксперименте приняло участие 23 испытуемых, из которых 7 демонстрировали наибольшую разницу между амплитудами характерных компонент когнитивного вызванного потенциала в лобной доле, столько же в затылочной доле. И у 9 испытуемых максимальные значения величина  $M$  принимала между лобной и затылочной долями, вблизи моторной коры.

Выделение данных индивидуальных особенностей несложно производить автоматически, разделив каналы на соответствующие области и подсчитывая сумму параметров магнитуды  $M$  характерных компонент когнитивного вызванного потенциала для каждой области. После чего сравнение полученных суммарных значений дает представление о том, в какой части головного мозга когнитивные вызванные потенциалы более выраженные. Далее эта информация может быть использована при настройке ВСИ.



**Рис. 2.** Распределение величины  $M$  (разницы между амплитудами компонент N2 и P3) по каналам для трех испытуемых

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках выполнения государственного задания (проект № FSRR-2020-0003).

## Литература

1. Broyd S., Debener S. Default-mode brain dysfunction in mental disorders: a systematic review // *Neurosci Biobehav Rev.* 2009. V. 33. P. 279296.
2. Cooper N.R. et al. Investigating evoked and induced electroencephalogram activity in task-related alpha power increases during an internally directed attention task // *Neuro Report.* 2006. V. 17. P. 205–208.
3. Maksimenko V.A. et al. Human personality reflects spatio-temporal and time-frequency eeg structure // *PLoS one.* 2018. V. 13, № 9. P. e0197642.
4. Hramov A.E., Koronovskii A.A., Makarov V.A. et al. *Wavelets in Neuroscience.* Heidelberg; New York: Springer, 2015. (Springer Series in Synergetics).
5. Schack B., Klimesch W. Frequency characteristic of evoked and oscillatory electroencephalographic activity in a human memory scanning task // *Neurosci. Lett.* 2002. V. 331. P. 107–110.
6. Levichkina E.V., Kaplan A.Ya. Unconscious Context Control of Visual Perception of Simple Stimuli: A Study Using Evoked Potentials // *Human Physiology.* 2009. V. 35, № 2. P. 74.

# Изменение пространственной структуры активности головного мозга при длительной монотонной зрительной нагрузке

М.С. Симонян, М.Ю. Новиков

Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

В настоящее время вопрос исследования биомедицинских сигналов, в частности активности головного мозга, подробно изучается с помощью методов нелинейной физики и информационных технологий. Сегодня самым распространённым как в научной среде, так и в клинической практике методом записи активности поверхностных структур головного мозга является метод электроэнцефалографии (ЭЭГ), позволяющий в реальном времени получить информацию о биоэлектрической активности, сопровождающей нейропсихологические процессы животных и человека [1]. Для анализа динамики сигналов ЭЭГ применяют методы устойчивых визуально вызванных потенциалов (SSVEP) [2], методы оценки колебательной активности, основанные на фурье- и вейвлет-преобразованиях [3, 4], возвратных характеристик [5]. Данные методы позволяют дать как качественную, так и количественную оценку мощности колебаний в различных частотных диапазонах [6], а также оценить повторяемость наблюдаемой активности в ряде событий. Для анализа активности глубоких структур головного мозга применяют методы, направленные на конкретное пространственное определение источника активности колебаний ЭЭГ, в том числе анализ независимых компонент (ICA) [7, 8], разложение по эмпирическим модам (EMD) [9], вейвлет-подходы для шумоподавления изображения и т. д. [10]. Данные методы могут также играть немаловажную роль в клинической практике (например, в качестве диагностики изменений активности головного мозга при прохождении различных психологических тестов), поскольку позволяют дать оценку продолжительности и стабильности паттернов ЭЭГ [11]. Особый интерес вызывает поиск устойчивых коррелятов ЭЭГ-активности головного мозга, которые могут носить достаточно универсальный характер, по крайней мере, для некоторых когорт испытуемых. Классическим примером такого нейрофизиологического коррелята является альфа-ритм в ЭЭГ головного мозга человека [12–17].

Для оценки пространственных структур ЭЭГ был предложен метод, в основе которого лежит адаптация преобразования Карунена – Лозва [18], обычно использующегося для задач других наук [19, 20].

Объектом исследования стали сигналы ЭЭГ-мониторинга коморбидной пациентки 62 лет с дневной гиперсомнией и нормальным ночным сном. Накануне и в день исследования у пациентки не было эпизодов дневного сна, а ночной сон составлял около 6,5–7 часов. Исследование проводилось в специализированной затемненной лаборатории, в комфортных условиях для испытуемой:

в тишине, полулежа в удобном кресле. Ход эксперимента включал в себя мониторинг ЭЭГ на двух этапах: 1 этап – состояние пассивного бодрствования с закрытыми глазами в течение 6–7 минут; 2 этап – 35 минут при проведении нейропсихологического тестирования. Нейропсихологическое тестирование заключалось в выполнении задания путем нажатия на кнопку пульта при предъявлении визуального стимула на экране монитора. Монитор располагался на расстоянии 90 см от испытуемой. Руки свободно лежали, и нажатие на пульт осуществлялось большим пальцем правой руки. Визуальным стимулом являлась группа объектов, состоящая из 2–6 белых квадратов, демонстрируемых в центре экрана на сером фоне. Время показа стимула составляло от 1 до 2,5 с, пауза между стимулами была порядка 3–7 с. Во время паузы между стимулами экран оставался серого цвета. Ход эксперимента представлен на рисунке 1.

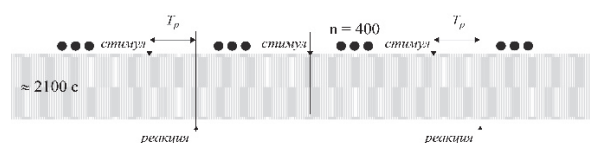


Рис. 1. Схематичный ход эксперимента (предъявляется стимул, ожидается реакция – нажатие на кнопку пульта)

Метод ортогональной декомпозиции, согласно Карунену – Лозву, включает решение уравнений:

$$\sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n K(x_p, x_q) \Phi^k(x^q) = \sum_{p=1}^n \lambda_k \Phi^k(x^p), \quad k = \overline{1, n} \quad (1)$$

и

$$K(x_p, x_q) = \frac{1}{T} \sum_{m=0}^T (\xi(x^p, t_m) \xi(x^q, t_m)). \quad (2)$$

Здесь  $\xi(x^p, t_m)$  и  $\xi(x^q, t_m)$  – ЭЭГ-сигналы, записанные с точек  $x^p$  и  $x^q$  на голове в момент времени  $t_m$ , а  $T$  задает интервал времени записи.

Собственные значения и векторы матрицы (1)–(2) находятся с помощью QL-алгоритма с неявными сдвигами [21], для чего матрица  $K(x_p, x_q)$  приводится к трехдиагональному виду методом Хаусхолдера.

Для анализа мощности альфа-ритма на ЭЭГ целесообразно использование непрерывного вейвлет-преобразования [6, 22, 23]. Его возможно задать следующим уравнением:

$$W(f, t_0) = \frac{1}{\sqrt{S}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{f, t_0}^* \left( \frac{t-t_0}{f} \right) dt. \quad (3)$$



Здесь  $f$  – аналог частоты в преобразовании Фурье,  $x(t)$  – сигнал,  $\Psi_{f,t_0}^*(t)$  – материнский вейвлет, где \* означает комплексную сопряженность.

В последнее время более широкие распространение и применение приобретает вейвлет Морле:

$$\psi_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt[3]{\pi}} e^{j2\pi\eta} e^{-\frac{\eta^2}{2}}. \quad (4)$$

Вейвлет Морле обеспечивает наилучшее соотношение между частотным и временным разрешением. Каждый одномерный сигнал  $x(t)$  позволяет оценить двумерную поверхность вейвлета как

$$W(f, t_0) = |W(f, t_0)| e^{j\phi(f, t_0)}. \quad (5)$$

Для каждой частоты  $f$  в любой момент времени  $t_0$  поверхность  $W(f, t_0)$  характеризует колебательную активность для исходного сигнала  $x(t)$ . После этого мы определяем интегрированное распределение энергии  $\langle E(t_0) \rangle$  для определенного диапазона частот  $[f_{\min}; f_{\max}]$  как

$$\langle E(t_0) \rangle = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} |W(f, t_0)|^2 df. \quad (6)$$

Частотный диапазон  $\Delta_{\alpha} f$ ,  $f \in (8; 12)$  соответствует альфа-ритму [28]. Данный диапазон был разделен на полосы по 1 Гц.

Функция  $\langle E(t_0) \rangle$  рассчитывалась для каждого сигнала ЭЭГ, а затем усреднялась во временном окне  $\Delta t = 5$  с:

$$\langle E_k(n, t'_0) \rangle = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \langle E_k(n, t_0) \rangle dt. \quad (7)$$

Здесь  $k$  – номер диапазона,  $n$  – порядковый номер сигнала ЭЭГ,  $t'_0$  – дискретное время.

Таким образом, полная энергия вейвлет-преобразования на диапазон альфа-волн и сумма энергий для каждой стадии эксперимента соответственно представляются через следующие формулы:

$$\langle E(t'_0) \rangle = \sum_{k=1}^5 \sum_{n=1}^N \langle E_k(n, t'_0) \rangle \quad (8)$$

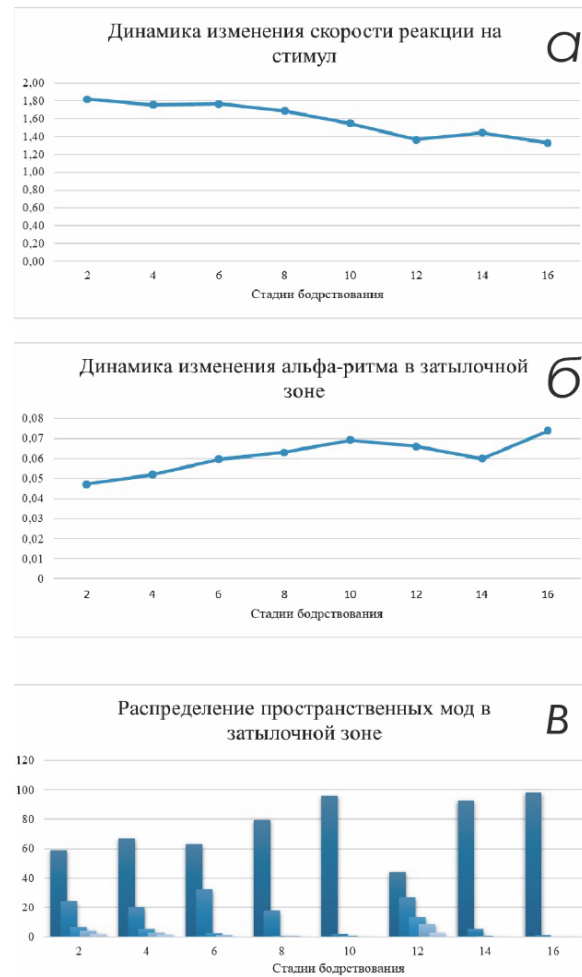
и

$$\langle E_s \rangle = \sum_{t=1}^m \langle E(t) \rangle. \quad (9)$$

Результаты всестороннего численного анализа нейropsychологического состояния испытуемого показаны на рис. 2.

Реакция пациента во время эксперимента демонстрирует почти постоянное время на первых трех этапах (1–3), а затем ускоряется до минимума St6, после чего время реакции снова немного увеличивается на стадии 7 (см. рис. 2, а). На рис. 2, б показана динамика мощности альфа-ритма ЭЭГ в затылочной области для одних и тех же стадий 1–7 активного бодрствования. Мощность альфа-ритма непрерывно увеличивается до стадии 5, после чего начинает снижаться. На рис. 2, в показано последовательное изменение распределения пространственных мод преобразования Карунена – Лоэва в затылочной области во время активных стадий. Количество значимых мод регионов варьируется от 1 до 5. Пространственная структура характеризуется выраженным преобладанием пер-

вой моды. При этом на стадиях 1–3 при наблюдаемом сохранении времени реакции первая компонента имеет постоянную амплитуду, начиная расти дальше параллельно с увеличением скорости реакции испытуемого. В то же время моды с меньшим модулем демонстрируют более сложную динамику. На первых двух этапах пространственная структура не меняется, затем происходит выделение двух выраженных по амплитуде мод и уменьшение амплитуд остальных, что приводит к вырожденной ситуации на этапе 5, а именно к почти однородной динамике только одного пространственного паттерна, описываемого первой модой. Однако на этапе 6 структура восстанавливается, демонстрируя наличие всех мод.



**Рис. 2.** Сглаженная зависимость длительности реакции на раздражитель от текущего этапа активного бодрствования (а); динамика мощности альфа-ритма сигнала ЭЭГ (б); динамика распределения пространственных мод Карунена – Лоэва (моды К-ЛТ) (в)

Согласно физическим представлениям, количество режимов К-ЛТ характеризует меру сложности сигнала. Другими словами, чем больше пространственных мод наблюдается, тем более когерентные паттерны одновременно развиваются в данной пространственной зоне проекции мозга (в данном случае затылочной) и, таким образом, сложность сигнала ЭЭГ выше. Комплексный анализ ситуации дает возможность наблюдать закономерности в процессе адаптации пациента с ги-

персомнией во время длительного монотонного процесса восприятия зрительных стимулов. Как известно, увеличение мощности альфа-ритма на ЭЭГ наблюдается в покое, что свидетельствует об эффективной адаптации к условиям окружающей среды [24]. То есть экспериментально выявленное увеличение мощности альфа-ритма, а также уменьшение времени реакции на раздражитель, с одной стороны, свидетельствует о способности мозга адаптироваться к выполнению длительной монотонной умственной деятельности, при этом, с другой стороны, такая нагрузка вызывает невыносимую сонливость и общее расслабление. В литературе этот эффект описывается как парадоксальное торможение возбуждения в нервной системе при монотонном внешнем раздражении, что характерно для пациентов с гиперсомнией [25]. Анализ распределения пространственных мод преобразования Карунена – Лоэва позволяет детально рассмотреть пространственные явления, сопровождающие этот процесс.

Увеличение амплитуды основной моды К-ЛТ соответствует процессу увеличения мощности альфа-ритма, наглядно демонстрируя процесс упрощения пространственной колебательной активности в затылочной области мозга. Можно предположить, что в начале активной стадии экспериментального процесса решаемая пациентом задача была для него новой и из-за краткого изложения вызвала определенный стресс. Первичное распределение с ярко выраженными максимумами первых двух мод отражает первичный процесс, в котором альфа-ритм выражен слабо. Процесс адаптации к условиям эксперимента вызывает ситуацию «упрощения» пространственной конструкции. Визуальные анализаторы настроены на решение поставленной задачи, поэтому время реакции сокращается. При этом во время эксперимента возникает утомляемость, по-видимому особенно выраженная в связи с гиперсомнией пациента, что приводит к новому усложнению пространственной структуры ЭЭГ затылочной кости и падению мощности альфа-ритма.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Минздрава России № 056-00030-21-01 от 05.02.2021 г. «Теоретическое и экспериментальное исследование интегративной активности различных физиологических систем человека при стрессовых воздействиях» (номер государственного учета НИОКТР 121030900357-3).

### Литература

1. Feyissa A.M., Tatum W.O. Adult EEG // Handbook of clinical neurology. – 2019. – V. 160. – P. 103–124.
2. İşcan Z., Nikulin V.V. Steady state visual evoked potential (SSVEP) based brain-computer interface (BCI) performance under different perturbations // PloS one. – 2018. – V. 13, № 1. – P. e0191673.
3. Lin Z. et al. Frequency recognition based on canonical correlation analysis for SSVEP-based BCIs // IEEE transactions on biomedical engineering. – 2006. – V. 53, № 12. – P. 2610–2614.
4. Adeli H., Zhou Z., Dadmehr N. Analysis of EEG records in an epileptic patient using wavelet transform // Journal of neuroscience methods. – 2003. – V. 123, № 1. – P. 69–87.
5. Jonak K. et al. The clinical application of EEG-signals recurrence analysis as a measure of functional connectivity: Comparative case study of patients with various neuropsychiatric disorders // Brain sciences. – 2020. – V. 10, № 6. – P. 380.
6. Hramov A.E. et al. Wavelets in neuroscience. – Berlin; Heidelberg: Springer, 2015.
7. Kobayashi K. et al. Isolation of epileptiform discharges from unaveraged EEG by independent component analysis // Clinical neurophysiology. – 1999. – V. 110, № 10. – P. 1755–1763.
8. Labounek R. et al. Stable scalp EEG spatio-spectral patterns across paradigms estimated by group ICA // Brain topography. – 2018. – V. 31, № 1. – P. 76–89.
9. Hansen S.T. et al. Unmixing oscillatory brain activity by eeg source localization and empirical mode decomposition // Computational intelligence and neuroscience. – 2019. – V. 2019.
10. von Ellenrieder N. et al. Detection and magnetic source imaging of fast oscillations (40–160 Hz) recorded with magnetoencephalography in focal epilepsy patients // Brain topography. – 2016. – V. 29, № 2. – P. 218–231.
11. Makarov V.V. et al. Betweenness centrality in multiplex brain network during mental task evaluation // Physical Review E. – 2018. – V. 98, № 6. – P. 062413.
12. Bazanova O.M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. – 2014. – V. 44. – P. 94–110.
13. Herrmann C.S. et al. EEG oscillations: from correlation to causality // International Journal of Psychophysiology. – 2016. – V. 103. – P. 12–21.
14. Ghiani A. et al. Binding mechanisms in visual perception and their link with neural oscillations: a review of evidence from tACS // Frontiers in Psychology. – 2021. – V. 12. – P. 779.
15. Sterman M.B. Physiological origins and functional correlates of EEG rhythmic activities: implications for self-regulation // Biofeedback and Self-regulation. – 1996. – V. 21, № 1. – P. 3–33.
16. VanRullen R., Koch C. Competition and selection during visual processing of natural scenes and objects // J. Vis. – 2003. – V. 3. – P. 75–85.
17. Treder M.S. et al. Brain-computer interfacing using modulations of alpha activity induced by covert shifts of attention // Journal of neuroengineering and rehabilitation. – 2011. – V. 8, № 1. – P. 1–10.
18. Karhunen K. Über lineare Methoden in der Wahrscheinlichkeitsrechnung. – Helsinki: Universitat Helsinki, 1947. – V. 37.
19. Maccone C. Special relativity and the Karhunen-Loève expansion of Brownian motion // Nuovo Cim., B. – 1987. – V. 100, № 3. – P. 329–341.
20. Hožič M., Stefanovska A. Karhunen-Loève decomposition of peripheral blood flow signal // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 2000. – V. 280, № 3/4. – P. 587–601.
21. Korn G., Korn T. Guide to mathematics for scientists and engineers. – 1978.
22. Torresani B. Continuous wavelet transform // Savoie. – Paris, 1995. – V. 675. – P. 676.
23. Aldroubi A., Unser M. A. (ed.). Wavelets in biology and medicine. – CRC Press, 1996.
24. Bazanova O.M., Vernon D. Interpreting EEG alpha activity // Neuroscience & Biobehavioral Reviews. – 2014. – V. 44. – P. 94–110.
25. Zueva E.Y., Zuev K.B. The concept of dominance by AA Ukhtomsky and Anticipation // Anticipation: Learning from the past. – Cham : Springer, 2015. – P. 13–35.



# Процессы торможения в нейронных сетях и контроль эпилепсии

Е.Ю. Ситникова

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва  
email: eu.sitnikova@gmail.com

Торможение – ключевой процесс в центральной нервной системе млекопитающих. Этот активный процесс контролирует импульсную активность и подавляет избыточную активацию нейронов. Тормозным нейромедиатором в центральной нервной системе млекопитающих является ГАМК (гамма-аминомасляная кислота). Весь спектр сложных тормозных реакций нейронов определяется на уровне мембранного потенциала нейронов и на уровне нейросетей. На синаптическом уровне механизмы торможения опосредованы функциями рецепторов к ГАМК (т.е. ГАМК<sub>A</sub>- и ГАМК<sub>B</sub>-рецепторами). На уровне нейронных сетей – тормозной модуляцией входов и тонкой настройкой нейросетей. Стойкий дефицит торможения может вызвать состояние гипервозбудимости нейронов и, как следствие, привести к развитию эпилепсии. В статье описаны некоторые принципы нейронной организации торможения в коре больших полушарий и в таламокортикальной системе. Обсуждается роль торможения, опосредованного ГАМК<sub>A</sub>- и ГАМК<sub>B</sub>-рецепторами, в контроле состояний сна и пик-волновой (абсанс) эпилепсии.

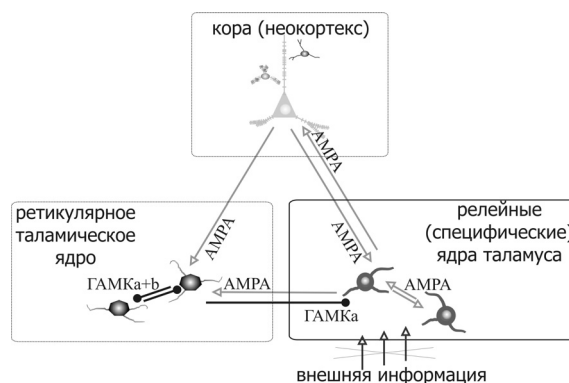
Нейронные сети коры больших полушарий представляют наибольший интерес, поскольку именно эти сети отвечают за высшие нервные функции. Понимание процессов тормозной модуляции этих сетей перспективно в плане моделирования искусственного интеллекта. Тонкие механизмы торможения нейронных сетей головного мозга модулируют активационные процессы, и благодаря балансу процессов торможения и активации (transegrity) нейронные сети работают как сложная нелинейная динамическая система [1]. Особенности нейронной организации функции торможения в коре больших полушарий описаны в разделе «Тормозные нейроны в неокортексе».

Тормозные процессы в глубоких структурах головного мозга контролируют витальные функции, и их нарушение приводит к неврологическим расстройствам. Например, нарушение торможения в базальных ганглиях вследствие дефицита дофамина в nigrostriальной системе приводит к развитию болезни Паркинсона. Нарушения торможения внутри таламуса приводят к расстройствам сознания и появлению состояний «абсанса» с характерными генерализованными пик-волновыми разрядами на электроэнцефалограмме [2]. Фокус внимания этой статьи направлен на процессы торможения в таламокортикальной системе головного мозга во время сна и пик-волновой (абсанс) эпилепсии.

## Сон, процессы торможения и сонные веретена

Торможение является ключевым процессом, обуславливающим состояние сна. По мнению ака-

демика И.П. Павлова («кортикальная теория сна»), сон является следствием процессов внутреннего торможения, широко распространенного, охватывающего кору больших полушарий и глубокие структуры головного мозга, включая промежуточный и средний мозг. Процессы торможения головного мозга в состоянии сна радикально видоизменяют работу таламокортикальной системы (рис. 1). В состоянии бодрствования организм ориентирован на восприятие внешней информации. Сенсорный приток от периферии проходит через специфические (релейные) ядра таламуса и направляется в соответствующие проекционные области коры. В этом состоянии мембранный потенциал нейронов релейных ядер таламуса составляет  $-55...-65$  мВ (слабая деполяризация, что соответствует тонической форме импульсной активности, tonic mode). Регуляцию мембранного потенциала нейронов релейных ядер таламуса осуществляют ГАМК-эргические нейроны ретикулярного таламического ядра (RTN).



**Рис. 1.** Схема таламокортикальной системы крысы, включающая кору больших полушарий и таламус («подкорковый» отдел промежуточного мозга). Ретикулярное ядро таламуса содержит тормозные нейроны, использующие нейромедиатор гаммааминомасляная кислота, ГАМК. Релейные ядра таламуса содержат возбуждающие нейроны, синтезирующие нейромедиатор глутамат. ГАМК<sub>A</sub>, ГАМК<sub>B</sub> – два типа рецепторов ГАМК; AMPA – рецептор нейромедиатора глутамата, активация которого вызывает быстрый возбуждающий ответ нейрона-мишени

В состоянии дремоты и медленноволнового сна ситуация существенно изменяется. При засыпании ослабевает поток внешней информации, поступающей в кору через релейные ядра таламуса, и снижается активность восходящих тонических влияний активирующих систем мозга. Это приводит к снижению мембранного потенциала нейронов и к изменению характера их импульсной активности. В состоянии сна мембранный потенциал нейронов релейных ядер таламуса составляет

–65...–75 мВ. Таламические нейроны генерируют «пачки» импульсов (пачечная активность, *burst firing*) [3, 4], увеличивается уровень синхронизации между нейронами релейных ядер таламуса и ретикулярным таламическим ядром (RTN). Все нейроны RTN являются тормозными, они формируют контакты с близлежащими специфическими ядрами таламуса и способны спонтанно генерировать пачки импульсов, выполняя функцию пейсмейкеров. Ритмическая активность поступает из таламуса в неокортекс по системе восходящих таламокортикальных проекций. Нисходящие кортико-таламические проекции поддерживают и координируют ритмическую активность коры и таламуса [5, 6].

Синхронная активность таламокортикальной системы в состоянии медленного сна на электроэнцефалограмме (ЭЭГ) появляется в виде сонных веретен и дельта-волн, так называемая медленно-волновая активность. Сонные веретена – это периодически повторяющиеся эпизоды синусоидообразных колебаний, частота которых колеблется в пределах 10–14 Гц у человека, а амплитуда постепенно нарастает, а затем убывает на протяжении более 0,5 с (у человека длительность веретен может достигать нескольких секунд) [7]. Интересно, что у млекопитающих и человека частотно-временные характеристики сонных веретен и дельта-волн на ЭЭГ похожи, несмотря на разницу в строении головного мозга.

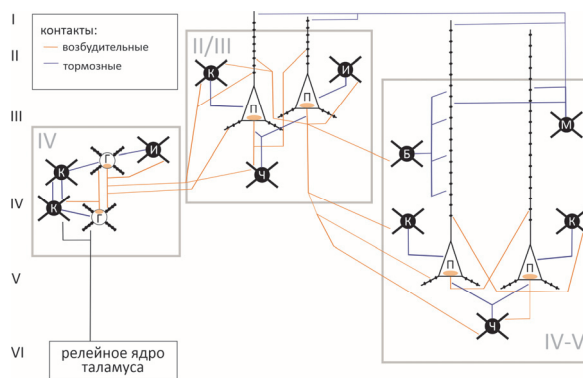
#### Тормозные нейроны в неокортексе

Кора больших полушарий (неокортекс) у млекопитающих и человека имеет сходный план строения. Основная масса нейронов неокортекса относится к классу возбуждающих. Это, в первую очередь, пирамидные нейроны (порядка 80 % нейронов неокортекса), использующие нейромедиатор глутамат. Тормозные нейроны играют роль координаторов нейросетевой активности. В неокортексе можно выделить два типа тормозных нейронов (обозначены черным цветом на схеме на рис. 2). Первый тип – корзинчатые нейроны (клетки К), которые обеспечивают прямое торможение и формируют синапсы на соме пирамидных нейронов (эффективность синаптических контактов на соме выше, чем на дендритах). Второй тип – нейроны «локальных цепей» (клетки Б, Ч и М), которые обеспечивают возвратное торможение и формируют контакты на базальных дендритах нейронов-пирамид (клетки П).

Корзинчатые нейроны синтезируют нейромедиатор ГАМК (т.е. ГАМК-эргические клетки), имеют крупное округлое тело и тонкие длинные дендриты. Нейроны этого типа, располагающиеся в слоях IV, V и VI, формируют локальные контакты с клетками своего слоя. Нейроны, локализованные в слое II/III, иннервируют более широкую область в пределах нескольких слоев (рис. 2). Импульсы, которые генерируют корзинчатые интернейроны при деполяризации, следуют с большой частотой (*fast spiking*) и коротким периодом задержки (0,4–0,6 мс). У этих нейронов период сле-

довой гиперполяризации в 5–7 раз короче, чем у других клеток, и они способны воспроизводить высокочастотные разряды благодаря наличию на мембранах особых  $K^+$  каналов ( $Kv3.1$  и  $Kv3.2$ ).

Не-корзинчатые интернейроны – бесшипиковые ГАМК-эргические нейроны, к которым относятся биполярные клетки с двойным пучком дендритов (*Bitufted cells*, Б, рис. 2) и клетки Мартинотти (*Martinotti cells*, М, рис. 2), немногочисленны и располагаются в разных слоях неокортекса. Их аксоны широко ветвятся в пределах нескольких слоев.

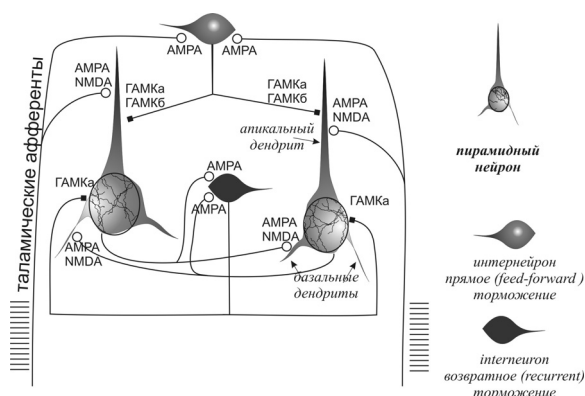


**Рис. 2.** Схема нейронной организации неокортекса в проекционной области вибрисс у грызунов. Римские цифры – слои неокортекса. Тормозные ГАМК-эргические нейроны показаны черным цветом, активационные глутаматэргические нейроны – белым. Прямые входы от релейного ядра таламуса адресованы гранулярным нейронами III–IV слоев (Г) и ГАМК-эргическим корзинчатым клеткам (К). Там же локализованы интернейроны (И), которые не связаны с таламическим входом и формируют тормозные контакты с гранулярными клетками (Г). В слоях II/III и V/VI расположены пирамидные нейроны (П) и тормозные нейроны «локальных цепей»: клетки-канделябры (Ч), биполярные нейроны (Б) и клетки Мартинотти (М) (по данным [8])

#### Торможение в коре и формирование пик-волновых разрядов (нейронные механизмы)

Некоторые нейроны неокортекса обладают способностью спонтанно генерировать ритмические разряды, которые могут трансформироваться в эпилептические разряды. Этой способностью обладают нейроны со спонтанной пачечной импульсной активностью (*intrinsic bursting*) [9]. На мембранах этих нейронов находятся ионные каналы, проводящие низкопороговый кальциевый ток ( $I_T$ ). Активация этих каналов (ток  $I_T$ ) вызывает небольшую волну деполяризации, так называемый низкопороговый разряд (*low-threshold spike, LTS*), на гребне которой появляются 2–3 импульса. При снижении уровня ГАМК-торможения (вследствие патологии или фармакологической блокады) нейроны с пачечной активностью «растормаживаются», увеличивается длительность пачек импульсов, повышается уровень синхронизации между нейронами. В результате нейросеть может перейти в состояние гиперсинхронизации и генерировать разряды типа «пик – волна» [9].

В 2007 г., основываясь на принципах нейронной организации неокортекса (рис. 2), мы создали модель нейронного модуля, который способен поддерживать ритмическую активность в виде эпилептических комплексов «пик – волна» [10]. Эта модель (рис. 3) содержит два типа ГАМК-эргических интернейронов и пирамидные нейроны, связанные с афферентами таламуса. Возбудительные реакции нейронов опосредованы AMPA-рецепторами к глутамату, активация которых вызывает быстрый ответ нейрона-мишени. Тормозные реакции – быстрые реакции, опосредованные ионотропными ГАМК<sub>A</sub>-рецепторами, и более медленные реакции, опосредованные метаботропными ГАМК<sub>B</sub>-рецепторами.



**Рис. 3.** Схематическое изображение элементов нейронного модуля коры, которые были использованы нами для моделирования локального потенциала поля во время пик-волновых разрядов [10]. Модуль получает активационные 10 Гц импульсы из таламуса [11]

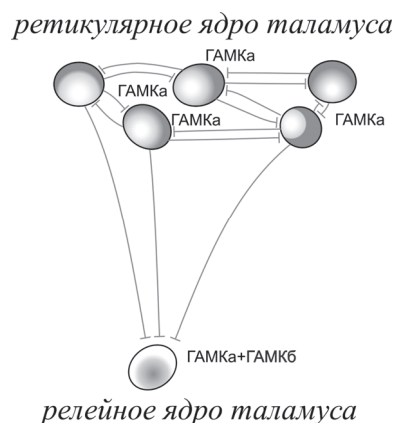
Результаты работы этой модели показали, что главный компонент «пик» комплекса «пик – волна» отражает процесс возбуждения пирамидных нейронов за счет активации AMPA-рецепторов пирамидных нейронов, локализованных на апикальных дендритах. «Позитивный компонент» комплекса «пик – волна» является следствием AMPA-эргических контактов между пирамидными нейронами. Компонент «волна» отличается полиморфизмом, его амплитуда и форма зависят от свойств ГАМК-эргической иннервации пирамидных нейронов, главным образом, от силы прямого ГАМК<sub>A</sub>,<sub>B</sub>-эргического торможения интернейронов, непосредственно связанных с таламическим входом.

### Торможение в таламусе и формирование пик-волновых разрядов (нейронные механизмы)

Нейроны релейных таламических ядер могут находиться в двух режимах: тонической активности (*tonic mode*) в состоянии бодрствования и пачечной активности (*bursting mode*) в состоянии медленного сна. Эти два режима отличаются по значению мембранного потенциала и проводимости мембраны. В состоянии сна нейроны таламуса находятся в состоянии *bursting mode* и генерируют спонтанную ритмическую активность, которая

приобретает вид сонных веретен на ЭЭГ. Пачечная активность таламуса обусловлена синхронной работой ГАМК-эргических нейронов ретикулярного таламического ядра RTN (клетки-пейсмейкеры) и глутамат-эргических нейронов релейных ядер таламуса (см. выше). Долгое время считалось, что характерные для абсанс-эпилепсии пик-волновые разряды формируются вследствие усиления ритмической активности нейронов-пейсмейкеров в RTN [4, 12, 13]. В результате таламокортикальная сеть переходит в состояние гиперсинхронизации и сонно-веретенная активность преобразуется в разряды типа «пик – волна». Усиление пейсмейкерных функций нейронов таламуса связано с ослаблением ГАМК<sub>A</sub>-торможения (кортико-ретикулярная теория П. Глора – обзор [14]) или с усилением  $Ca^{2+}$  тока  $I_t$  (обзор [12]), который участвует в формировании пачечной активности нейронов.

ГАМК-эргические контакты нейронов RTN с нейронами релейных ядер способствуют синхронизации ритмической активности этих двух ядер. Нейроны RTN формируют латеральные ГАМК<sub>A</sub>-эргические контакты друг с другом и ГАМК<sub>A</sub>- и ГАМК<sub>B</sub>-эргические контакты с клетками релейных ядер (рис. 4) [9].



**Рис. 4.** Схема ГАМК-эргических контактов между ретикулярным и релейным ядрами таламуса

В норме ГАМК<sub>A</sub>-эргические контакты RTN с релейными ядрами более эффективны, чем ГАМК<sub>B</sub>-эргические. При активации ГАМК<sub>A</sub>-рецепторов формируется быстрый компонент тормозного постсинаптического потенциала (ТПСП) длительностью 100–150 мс, а при активации постсинаптических ГАМК<sub>B</sub>-рецепторов – медленный компонент длительностью порядка 300 мс. Длительность ТПСП определяет частоту ритмической активности нейронов таламо-таламической сети, и в случае преобладания ГАМК<sub>A</sub>-эргического компонента ТПСП нейроны релейных ядер генерируют вспышки импульсов с частотой 10–14 Гц, характерной для сонных веретен. В случае преобладания ГАМК<sub>B</sub>-эргического компонента (300 мс) формируются залпы импульсов с частотой 3 Гц, свойственной пик-волновым разрядам человека.

Ранее полагали, что причиной абсанс-эпилепсии может быть ослабление ГАМК<sub>A</sub>-эргичес-

кой передачи в таламусе (обзор [15]), хотя это предположение в дальнейшем подверглось серьезной критике (см. ниже). Это снижает уровень ГАМК-эргического торможения внутри RTN, в результате возрастает активность клеток RTN и увеличивается тормозная иннервация клеток-мишеней в релейных ядрах таламуса. В данной ситуации действие ГАМК в релейных ядрах опосредовано ГАМК<sub>б</sub>-рецепторами, и ритмическая активность в релейных ядрах может принимать форму «пик – волна» с частотой 3 Гц. В пользу правомерности вышеизложенного механизма говорит тот факт, что агонисты ГАМК<sub>б</sub> усиливают пик-волновые разряды, а ГАМК<sub>б</sub> антагонисты – ослабляют (обзоры [16, 17]).

На протяжении долгих лет ведущие мировые ученые, например коллективы итальянских (проф. Avanzini [4, 12]) и французских исследователей (проф. Leresche [15]), придерживались представлений о том, что нейроны RTN служат источником пик-волновых разрядов, но в последние годы данная концепция подверглась существенной критике и была пересмотрена. В своем последнем обзоре Leresche et al. (2012) [15] приводят ряд весомых свидетельств в пользу того, что RTN не участвует в инициации пик-волновых разрядов. Наиболее весомыми контраргументами являются следующие:

- введение ГАМК-антагонистов пенициллина и бикикулина непосредственно в таламус не вызывает судорожной активности у кошек [14, 18];

- абсанс-эпилепсия не сопровождается снижением эффективности ГАМК-эргических механизмов торможения в таламусе [5]. У большинства нейронов релейных ядер таламуса (60 % у кошек и 90 % у крыс GAERS) во время спонтанных пик-волновых разрядов наблюдают ритмический ГАМК-эргический компонент ТПСР синхронно с компонентом «пик» пик-волнового комплекса [19, 20], что также свидетельствует о высокой эффективности ГАМК-эргического торможения таламических нейронов при развитии абсанс-эпилепсии.

О важности тормозных механизмов таламуса в формировании пик-волновой эпилепсии говорит повышенный уровень «тонического» ТПСР, обнаруженный в релейных таламических ядрах у животных с наследственной склонностью к данной болезни [21]. Тоническая форма ТПСР обусловлена активацией внесинаптических ГАМК-рецепторов, в отличие от фазических ТПСР, которые опосредованы (пост)синаптическими ГАМК-рецепторами. Внесинаптические ГАМК-рецепторы отличаются от синаптических более высокой чувствительностью к ГАМК и низкой скоростью десенситизации (это можно объяснить наличием дельта-субъединицы в составе внесинаптических рецепторов) [22]. Показано, что ГАМК-эргическое торможение релейных ядер таламуса имеет тонический характер, и оно на ~ 80–90 % обусловлено активацией внесинаптических рецепторов. Основным патологическим фактором усиления тонического торможения в таламусе при развитии абсанс-эпилепсии является нарушение обратного

захвата ГАМК за счет снижения активности астроцитарного транспортера ГАТ-1 [21, 23]. Вследствие этого во внесинаптическом пространстве сохраняется повышенная концентрация ГАМК, мембраны нейронов удерживаются в состоянии гиперполяризации, на фоне которой формируется серия низкочастотных  $Ca^{2+}$  импульсных разрядов (LTS) и пачки быстрых ВПСР, таким образом, нейроны генерируют залпы импульсов с частотой пик-волновых разрядов.

Отличия в организации торможения внутри таламуса у человека и животных отражаются на частотных характеристиках пик-волновых разрядов. Известно, что у крыс с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии частота пик-волновых разрядов составляет 7–11 Гц [17], у кошек (фармакологическая модель генерализованной эпилепсии) 3–4,5 Гц [14], у человека 2,5–4 Гц. Эту разницу можно объяснить тем, что у крыс в большинстве ядер дорсального таламуса отсутствуют ГАМК-эргические нейроны (исключение составляет латеральное колленчатое тело), и единственным внешним источником торможения для всех ядер таламуса является ретикулярное таламическое ядро [24]. У кошек и человека тормозные нейроны находятся во всех без исключения частях таламуса, поэтому клетки таламуса получают тормозную иннервацию из двух источников: внешнего (нейроны RTN) и внутреннего (ГАМК-эргические нейроны локальных сетей таламуса). Таким образом, продолжительность каждого отдельного колебания мембранного потенциала нейронов таламических сетей у кошек и человека может быть выше, чем у крыс, а частота разрядов – ниже.

### Контроль возбуждения-торможения и абсанс-эпилепсия

Генерализованные эпилептические разряды с частотой около 3 Гц можно спровоцировать инъекциями сверхпороговых доз пенициллина. Этот подход был использован в *in vivo* модели генерализованной эпилепсии у кошек с характерными 3 Гц комплексами «пик – волна» (обзор [14]). В высоких дозах пенициллин действует как антагонист ГАМК-рецепторов, т.е. блокирует торможение, что приводит к перевозбуждению нервных клеток (эпилептогенный эффект). Системное введение пенициллина кошке вызывало трансформацию ритмической активности, характерной для сонных веретен (частотой ~ 9 Гц). Эта частота постепенно снижалась скачкообразно: 9–6–3 Гц. Активность 3 Гц имела форму «пик – волна». Трансформация сонных веретен в пик-волновые разряды была получена в других моделях *in vitro* [25] и в компьютерных моделях *in silico* [9]. В этих работах был описан процесс формирования сонных веретен на фоне блокады ГАМК-рецепторов таламокортикальных нейронов под действием ГАМК-антагониста бикикулина. Такое вмешательство повышало эффективность ГАМК-эргического торможения, в результате наблюдали преобразование

сонно-веретенных колебаний (10 Гц) в более медленные (3 Гц) синхронные разряды «пик – волна».

Среди веществ, влияющих на процессы торможения и способных провоцировать пик-волновую активность, можно выделить гамма-гидроксипиридат (ГНВ) [26]. Это ненасыщенная жирная кислота, продукт естественного метаболизма ГАМК (производится нейронами в незначительных количествах). При системном введении ГНВ можно наблюдать состояние «абсанса» и появление пик-волновых разрядов на ЭЭГ с частотой 2,5–3 Гц у обезьян и 6–7 Гц у крыс. Механизм проэпилептического действия ГНВ окончательно не изучен. Вероятно, что ГНВ нарушает работу ГАМК-рецепторов и глутаматэргическую нейротрансмиссию.

Противоположное действие оказывают препараты вальпроовой кислоты (Апилепсин, Орфирил, Конвулекс, Valproic acid, Деракене®, Деракоте®, Еривал®), которые используются для лечения абсанс-эпилепсии. Противозепилептическое действие вальпроатов, по-видимому, связано с усилением процессов торможения в эпилептической области за счет активации процесса восстановления и синтеза ГАМК. Возможно, что вальпроаты препятствуют взаимодействию глутамата с NMDA-рецепторами, благодаря чему снижается возбудимость нервной ткани.

Таким образом, тормозный нейромедиатор ГАМК является одним из ключевых агентов, контролирующих появление характерных для абсанс-эпилепсии пик-волновых разрядов. Прямое и косвенное влияние ГАМК на нейроны таламокортикальной системы опосредовано семейством ГАМК-рецепторов, расположенных на мембранах клеток-мишеней.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-015-00242а).

### Литература

1. *Buzsáki G.* Rhythms of the Brain. New York: Oxford University Press, 2006. 464 p. ISBN: 978-0-19-530106-9.
2. *Steriade M.* Sleep, epilepsy and thalamic reticular inhibitory neurons // *Trends Neurosci.* 2005. V. 28, № 6. P. 317–324; doi: 10.1016/j.tins.2005.03.007.
3. *Steriade M., McCormick D.A. et al.* Thalamocortical oscillation in the sleeping and aroused brain // *Science.* 1993. V. 262. P. 679–685.
4. *Avanzini G., Panzica F., de Curtis M.* The role of the thalamus in vigilance and epileptogenic mechanisms // *Clin. Neurophysiol.* 2000. Suppl. 2. P. S19–S26.
5. *Blumenfeld H., McCormick D.A.* Corticothalamic inputs control the pattern of activity generated in thalamocortical networks // *J. Neurosci.* 2000. V. 20, № 13. P. 5153–5162.
6. *Steriade M.* Neuronal substrates of sleep and epilepsy. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

7. *De Gennaro L., Ferrara M.* Sleep spindles: an overview // *Sleep Med. Rev.* 2003. V. 7. P. 423–440.

8. *Fox K.* Barrel cortex. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

9. *Destexhe A., Sejnowski T.J.* Thalamocortical assemblies. Oxford: Oxford University Press, 2001.

10. *Sargsyan A., Sitnikova E. et al.* Simulation of sleep spindles and spike and wave discharges using a novel method for the calculation of field potentials in rats // *J. Neurosci. Methods.* 2007. V. 164, № 1. P. 161–176.

11. *Sitnikova E.* Thalamo-cortical mechanisms of sleep spindles and spike-wave discharges in rat model of absence epilepsy (a review) // *Epilepsy Res.* 2010. V. 89, № 1. P. 17–26.

12. *Avanzini G., Franceschetti S.* Cellular biology of epileptogenesis // *Lancet Neurology.* 2003. V. 2. P. 33–42.

13. *Blumenfeld H.* The thalamus and seizures // *Arch. Neurol.* 2002. V. 59. P. 135–137.

14. *Kostopoulos G.K.* Spike-and-wave discharges of absence seizures as a transformation of sleep spindles: the continuing development of a hypothesis // *Clin. Neurophysiol.* 2000. Suppl. 2. P. S27–S38.

15. *Leresche N., Lambert R.C. et al.* From sleep spindles of natural sleep to spike and wave discharges of typical absence seizures: is the hypothesis still valid? // *Pflugers Arch.* 2012. V. 463, № 1. P. 201–212.

16. *Danober L., Deransart C. et al.* Pathophysiological mechanisms of genetic absence epilepsy in the rat // *Prog. Neurobiol.* 1998. V. 55. P. 27–57.

17. *Coenen A.M., van Luijckelaar E.L.* Genetic animal models for absence epilepsy: a review of the WAG/Rij strain of Rats // *Behav. Genetics.* 2003. V. 33. P. 635–655.

18. *Steriade M., Contreras D.* Spike-wave complexes and fast components of cortically generated seizures. I. Role of neocortex and thalamus // *J. Neurophysiol.* 1998. V. 80. P. 1439–1455.

19. *Steriade M., Contreras D.* Relations between cortical and thalamic cellular events during transition from sleep patterns to paroxysmal activity // *J. Neurosci.* 1995. V. 15, № 1. Pt. 2. P. 623–642.

20. *Pinault D., Leresche N., Charpier S. et al.* Intracellular recordings in thalamic neurones during spontaneous spike and wave discharges in rats with absence epilepsy // *J. Physiol.* 1998. V. 509. Pt. 2. P. 449–456.

21. *Cope D.W., Di Giovanni G., Fyson S.J. et al.* Enhanced tonic GABAA inhibition in typical absence epilepsy // *Nat. Med.* 2009. V. 15, № 12. P. 1392–1398.

22. *Cope D.W., Hughes S.W., Crunelli V.* GABAA receptor-mediated tonic inhibition in thalamic neurones // *J. Neurosci.* 2005. V. 25, № 50. P. 11553–11563.

23. *Crunelli V., Cope D.W., Terry J.R.* Transition to absence seizures and the role of GABA(A) receptors // *Epilepsy Res.* 2011. V. 97, № 3. P. 283–289.

24. *Jones E.G.* The Thalamus. New York: Plenum Press, 1985. 955 p.

25. *von Krosigk M., Bal T., McCormick D.A.* Cellular mechanisms of a synchronized oscillation in the thalamus // *Science.* 1993. V. 261. P. 361–364.

26. *Marescaux C., Vergnes M., Depaulis A.* Genetic absence epilepsy in rats from Strasbourg: a review // *J. Neural. Transm. [Suppl].* 1992. V. 35. P. 37–69.

# Автоматическая установка «ИнтелиКейдж» для исследования поведения лабораторных крыс

К.С. Смирнов<sup>1</sup>, А. Esmaeili<sup>2</sup>, Е.Ю. Ситникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва  
email: smirnov.kirill.sc@gmail.com

<sup>2</sup>Институт когнитивных нейронаук, Высшая школа экономики, г. Москва

Установка «ИнтелиКейдж» – полностью автоматизированная система, позволяющая исследовать поведение мышей/крыс в условиях домашней клетки и оценивать их когнитивные способности. В статье описана экспериментальная парадигма для исследования импульсивного поведения. Работа выполнена на самцах крыс WAG/Rij в возрасте 3–4 мес. Выделены следующие поведенческие последовательности: «исследующая», «проверяющая», «импульсивная», «остальное». Обнаружено, что ограничение сенсорного притока (состригание вибрисс) в раннем онтогенезе усиливало «исследующую» поведенческую последовательность в первые 4 дня эксперимента. Пик-волновая эпилепсия повлияла на характер «импульсивной» последовательности у крыс WAG/Rij. Так, особи с пик-волновыми разрядами на ЭЭГ отличались от бессимптомных особей более высоким уровнем «импульсивной» поведенческой последовательности во второй половине эксперимента (на 8-й день).

## Введение

Установка «ИнтелиКейдж» является инновационной системой, позволяющей оценивать поведение животных с минимальной вовлеченностью экспериментатора [1]. По сравнению с традиционными методами оценки поведения «ИнтелиКейдж» имеет несколько преимуществ, способствующих большей надежности и воспроизводимости данных. Среди них можно отметить: содержание животных в социальной группе, проведение непрерывных и продолжительных экспериментов, минимизацию человеческого вмешательства, настраиваемый дизайн экспериментальных парадигм. Несмотря на указанные преимущества, к настоящему времени версия «ИнтелиКейдж» для крыс была использована в малом количестве работ [2, 3].

В последние годы на фоне сообщений о наличии у детей с абсансными приступами когнитивных нарушений [4–6] появляются работы, посвященные исследованию способности к обучению у крыс WAG/Rij, являющиеся моделью генерализованной эпилепсии с абсансными приступами [7, 8]. Было показано, что нарушения памяти обнаруживаются у крыс линии WAG/Rij в возрасте, когда выраженность пик-волновых разрядов (ПВР) уже достигает своего максимума, однако в данных исследованиях сравнивались крысы разных линий и не была осуществлена регистрация ЭЭГ, что не позволяет установить связь между

выраженностью ПВР и когнитивных нарушений. В популяции крыс линии WAG/Rij ИВНДиНФ РАН около 25 % животных не имеют выраженных ПВР во взрослом возрасте [9], что позволило нам выделить их в отдельную группу (бессимптомный фенотип) и сравнить с крысами, имеющими выраженные ПВР (симптомный фенотип), по способности к обучению.

Еще один фактор, который модулирует когнитивные способности у крыс, – это ранний сенсорный опыт [10, 11]. Вибротактильная система крыс предоставляет уникальную сенсорную информацию о ближайшем окружении, которая необходима для исследовательского поведения, кормления и социальных взаимодействий. Состригание вибрисс у новорожденных крыс линии WAG/Rij ведет к более быстрому развитию ПВР [12], что может влиять на поведение животных во взрослом возрасте. Таким образом, мы исследовали влияние генетического фактора, связанного с эпилепсией, и сенсорного фактора, связанного с вибриссами, на поведенческие последовательности во время обучения взрослых крыс линии WAG/Rij.

## Методы исследования

Работа выполнена на 26 самцах крыс линии WAG/Rij в возрасте 3–4 месяца.

«ИнтелиКейдж» представляет собой камеру (100 × 100 × 36 см), закрывающуюся сверху прозрачными пластиковыми створками с отверстиями для поступления воздуха. Каждый угол камеры соединен с оперантным отсеком, вход в который оборудован кольцевой антенной для идентификации транспондера. В каждом отсеке за отдельной металлической створкой, открытие которой осуществляется программным обеспечением при выполнении животным требуемого действия, располагаются две бутылки с водой. Доступ к пище осуществляется из общей камеры и является свободным. Обучение реализуется путем питьевого подкрепления определенных последовательностей действий внутри оперантных отсеков.

Крыс содержали в установке «ИнтелиКейдж» небольшими группами (по 3 или 4 животных) в течение 8 дней, и в течение этого периода они обучались получать доступ к питьевой воде, совершая тычки носом в специальной области внутри оперантных углов. Следующая последовательность действий вела к питьевому подкреплению: «заход в оперантный угол» – «тычок носом в одну (левую или правую) сторону» – «двухсекундное ожидание» – «второй тычок носом в ту же сторо-



ну». При совершении данной последовательности доступ к воде открывался на 7 секунд. Если период ожидания между тычками составлял менее 2 секунд, в отсеке включался синий световой сигнал и доступ к воде блокировался на все время данного захода. Тычок носом в противоположную сторону после первого тычка не влиял на возможность получить подкрепление в изначально выбранной стороне, однако крыса не могла получить вознаграждение с противоположной стороны во время текущего захода.

Схема на рисунке демонстрирует выделенные нами поведенческие последовательности, состоящие из следующих действий: заход, тычок носом, питье и выход. Помимо описанной выше последовательности, ведущей к открытию доступа к бутылке с водой (данная последовательность обозначена нами как «успешная»), нами были выделены следующие поведенческие последовательности:

- «исследующая» (заход – выход);
- «проверяющая» (заход – тычок носом – выход);
- «импульсивная» (заход – тычок носом – ожидание меньше двух секунд – тычок носом – выход);
- «остальное» (в нее мы объединили другие формы поведения, которые вместе составляли не более 5 % от общего количества заходов и не продемонстрировали значительного влияния исследуемых факторов).

Одно животное было исключено из эксперимента из-за чрезвычайно низкой частоты посещений с питьем, что представляло угрозу для его жизни.

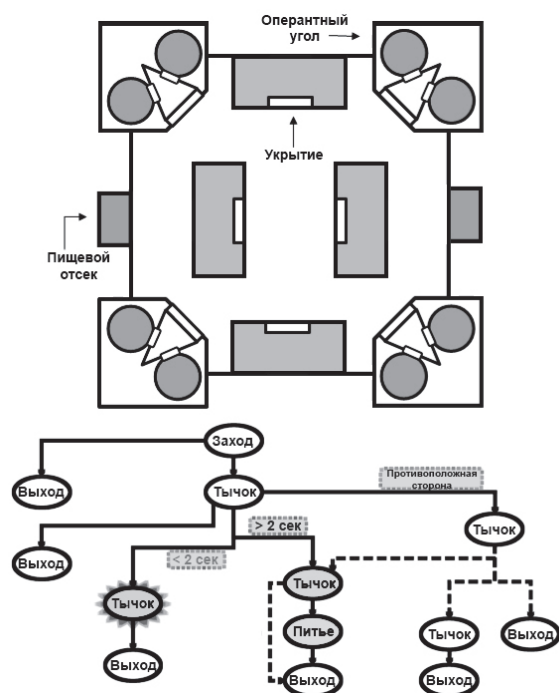


Схема эксперимента в установке «ИнтелиКейдж»

## Результаты

Нами было обнаружено статистически значимое увеличение процента посещений оперантных углов, сопровождаемых «успешной» поведенческой

последовательностью, по отношению к общему посещений ( $F(15; 360) = 9,0; p < 0,05$ ). Данный результат свидетельствует, что крысы в течение эксперимента улучшали выполнение задачи, при этом ни эпилептический фенотип, ни ограничение сенсорного притока в раннем онтогенезе не влияли на этот показатель.

Резкое увеличение процента посещений, сопровождаемых «импульсивной» последовательностью, наблюдалось в начале экспериментальной сессии, то есть при переходе от светлого к темному периоду 1-го дня (1Д / 1Н:  $29,4 \pm 2,9 / 55,7 \pm 2,5 \%$ ,  $p < 0,05$ ,  $t$ -тест для зависимых выборок). Этому сопутствовало уменьшение процента «исследующей» последовательности (1Д / 1Н:  $59,0 \pm 3,6 / 27,4 \pm 2,6 \%$ ,  $p < 0,05$ ,  $t$ -тест для зависимых выборок). Данный результат отражает обнаружение крысами закономерности, что посещения без тычков носом («исследующая» последовательность) не приводят к открытию доступа к питьевым бутылкам, в результате чего они начали совершать большее количество тычков, не усвоив правила, что для открытия доступа второй тычок должен быть не раньше двух секунд после первого, что отразилось в резком росте «импульсивной» последовательности.

Нами было обнаружено, что животные с симптомным фенотипом показали более высокий процент посещений, сопровождаемых «импульсивной» поведенческой последовательностью в ночную фазу восьмого дня эксперимента (симптомные / бессимптомные:  $64,6 \pm 3,8 / 45,3 \pm 5,1 \%$ ,  $p < 0,05$ , критерий Манна – Уитни). Аналогичная тенденция была обнаружена в дневную фазу седьмого дня эксперимента (симптомные / бессимптомные:  $64,7 \pm 4,2 / 48,6 \pm 4,9 \%$ ,  $p < 0,07$ , тест Манна – Уитни). Различия между симптомным и бессимптомным фенотипом также проявились при переходе с ночной фазы шестого дня к дневной фазе седьмого дня, когда только бессимптомные крысы показали статистически значимое уменьшение процента «импульсивной» поведенческой последовательности (6Н / 7Д:  $67,8 \pm 4,3 / 48,6 \pm 4,9 \%$ ,  $p < 0,05$ , критерий знаковых рангов Вилкоксона).

Ограничение сенсорного притока от вибрисс в раннем онтогенезе повлияло на исследовательское поведение в установке «ИнтелиКейдж». Парный  $t$ -тест выявил статически значимые отличия между крысами, повергнутыми состриганию вибрисс, и крысами, подвергнутыми имитации состригания, в проценте посещений, сопровождаемых «исследующей» последовательностью в ночную фазу первого дня ( $20,5 \pm 1,7 / 34,9 \pm 4,3$ ,  $p < 0,05$ ), ночную фазу второго дня ( $11,0 \pm 0,9 / 19,0 \pm 2,9$ ,  $p < 0,05$ ) и дневную фазу четвертого дня ( $12,6 \pm 1,7 / 25,9 \pm 5,1$ ,  $p < 0,05$ ), то есть в первой половине эксперимента.

## Обсуждение

Наши результаты показали, что «исследующая» поведенческая последовательность, которая представляет собой посещения оперантных углов



без тычков носом внутри них, составляет больший процент по отношению к общему количеству посещений у крыс, подвергнутых состриганию вибрисс в раннем онтогенезе, по сравнению с контролем. Данное увеличение было обнаружено в первой половине эксперимента, снизившись во второй половине до уровня крыс, подвергнутых имитации состригания. В течение первой половины экспериментальной задачи (дни 1–4) у сенсорно-депривированных крыс было обнаружено увеличение количества посещений без тычков носом, а затем оно снизилось до контрольного уровня. Можно предположить, что нарушенная чувствительность вибрисс, вызванная сенсорной депривацией в чувствительный период созревания вибротактильной системы, вела к меньшей опоре на данный сенсорный вход при исследовательском поведении.

Таким образом, заходя в оперантные углы в период ознакомления с экспериментальной установкой, крысы, подвергнутые состриганию, чаще не совершали активных действий по исследованию внутреннего пространства углов, что, однако, не влияло на обнаружение связи между тычками носом и получением доступа к воде и итоговое обучение. Данная интерпретация согласуется с литературными данными, указывающими на то, что ограничение сенсорного притока от вибрисс в чувствительный период созревания вибротактильной системы влияет на поведенческую стратегию, но не на общую эффективность выполнения задачи у взрослых животных [10, 13].

«Успешная» последовательность, по-видимому, отражает способность задержать поведенческую реакцию. Увеличение процента посещений оперантных углов, сопровождаемых данной последовательностью, и отсутствие значимых различий между группами животных указывают на то, что ни эпилептический фенотип, ни сенсорная депривация вибротактильной системы в раннем онтогенезе не нарушали обучение в используемой парадигме. Тем не менее бессимптомные крысы продемонстрировали меньшее количество посещений, сопровождаемых преждевременным тычком носом («импульсивная» последовательность) во второй половине эксперимента по сравнению с крысами с симптомным фенотипом, что указывает на наличие взаимосвязи между абсанс-эпилепсией и импульсивностью у крыс, аналогичной обнаруженной у пациентов с генерализованными эпилепсиями с абсансными приступами.

Нарушения внимания являются основным когнитивным дефицитом, обнаруживаемым у детей с абсансной формой эпилепсии, причем среди данных нарушений наиболее выраженным является повышенная импульсивность [6, 14, 15]. Импульсивность можно определить как склонность к быстрым, незапланированным реакциям на внутреннее или внешние раздражители со сниженным учетом негативных последствий этих реакций для импульсивных индивидуумов или окружающих. Было обнаружено, что при выполнении задания,

нацеленного на оценку импульсивности, дети с абсансной эпилепсией характеризовались большим количеством ошибок по типу ответа на нецелевой стимул, указывающих на проблемы с исполнительным контролем [6].

Существуют разные экспериментальные парадигмы, направленные на исследование разных форм импульсивности, например импульсивный выбор и импульсивное действие [16–18]. Используемая нами парадигма направлена на оценку импульсивной реакции, где импульсивное поведение провоцировалось необходимостью ожидания между поведенческими реакциями для получения подкрепления. Резкое снижение импульсивных ответов было обнаружено у крыс с бессимптомным фенотипом на 6-й день эксперимента, в то время как у крыс с симптомным фенотипом не наблюдалось выраженных изменений импульсивных ответов с течением времени. Различия между фенотипами стали очевидными только в результате длительного наблюдения, для которого, в отличие от большинства экспериментальных систем, установка «ИнтелиКейдж» хорошо подходит. Таким образом, влияние импульсивности может проявляться уже тогда, когда животные знакомы с экспериментальной задачей и способны ее выполнять, предотвращая дальнейшее улучшение показателей. Можно предположить, что образовательные проблемы у людей с абсансной эпилепсией могут быть вызваны аналогичным механизмом, который не позволяет им улучшить осуществление того или иного когнитивного процесса из-за нарушения внимания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-015-00242а).

## Литература

1. Kiryk A., Janusz A. et al. IntelliCage as a Tool for Measuring Mouse Behavior – 20 Years Perspective // *Behav. Brain Res.* 2020. V. 388. P. 112620.
2. Wu N., Wang F. et al. Effects of GABAB Receptors in the Insula on Recognition Memory Observed with IntelliCage // *Behav. Brain Funct.* 2017. V. 13, № 7.
3. Urbach Y.K., Raber K.A. et al. Automated Phenotyping and Advanced Data Mining Exemplified in Rats Transgenic for Huntington's Disease // *J. Neurosci. Methods.* 2014. V. 234. P. 38–53.
4. Cheng D., Yan X. et al. Neurocognitive Profiles in Childhood Absence Epilepsy // *J. Child Neurol.* 2017. V. 32. P. 46–52.
5. Wald E.L.A.F., Klinkenberg S. et al. Cognitive Development in Absence Epilepsy during Long-Term Follow-Up // *Child Neuropsychol.* 2019. V. 25. P. 1003–1021.
6. Cerminara C., D'Agati E. et al. Attention Impairment in Childhood Absence Epilepsy: An Impulsivity Problem? // *Epilepsy Behav.* 2013. V. 27. P. 337–341.
7. Leo A., Citraro R. et al. Cognitive Impairment in the WAG/Rij Rat Absence Model Is Secondary to Absence Seizures and Depressive-like Behavior // *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry.* 2019. V. 94. P. 109652.
8. Karson A., Utkan T. et al. Age-Dependent Decline in Learning and Memory Performances of WAG/Rij Rat Model of Absence Epilepsy // *Behav. Brain Funct.* 2012. V. 8. P. 51; doi: 10.1186/1744-9081-8-51.

9. *Sitnikova E., Smirnov K.* Active Avoidance Learning in WAG/Rij Rats with Genetic Predisposition to Absence Epilepsy // *Brain Res. Bull.* 2020. V. 165. P. 198–208.
10. *Papaioannou S., Brigham L., Krieger P.* Sensory Deprivation during Early Development Causes an Increased Exploratory Behavior in a Whisker-Dependent Decision Task // *Brain Behav.* 2013. V. 3, № 1. P. 24–34.
11. *Lee L.-J., Chen W.-J. et al.* Neonatal Whisker Trimming Causes Long-Lasting Changes in Structure and Function of the Somatosensory System // *Exp. Neurol.* 2009. V. 219, № 2. P. 524–532.
12. *Sitnikova E.* Neonatal Sensory Deprivation Promotes Development of Absence Seizures in Adult Rats with Genetic Predisposition to Epilepsy // *Brain Res.* 2011. V. 1377. P. 109–118.
13. *Kurzina N., Aristova I., Volnova A.* Effects of Early Sensory Deprivation on Spatial Learning in Adult Rats // *Biol. Commun.* 2017. V. 62, № 4. P. 256–260.
14. *Barone V., van Putten M.J.A.M., Visser G.H.* Absence Epilepsy: Characteristics, Pathophysiology, Attention Impairments, and the Related Risk of Accidents. A Narrative Review // *Epilepsy Behav.* 2020. V. 112. P. 107342.
15. *D'Agati E., Cerminara C. et al.* Attention and Executive Functions Profile in Childhood Absence Epilepsy // *Brain Dev.* 2012. V. 34, № 10. P. 812–817.
16. *Zaichenko M.I., Grigoryan G.A., Merzhanova G.Kh.* Escape and Avoidance Reactions to Painful Electrocutaneous Stimulation of the Self and Another in Rats with High and Low Levels of Impulsivity // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2019. V. 49, № 8. P. 1008–1015.
17. *Sosa R., Saavedra P. et al.* Three Laboratory Procedures for Assessing Different Manifestations of Impulsivity in Rats // *J. Vis. Exp.* 2019. Art. e59070; doi: 10.3791/59070.
18. *Pavlova, I.V., Zaichenko, M.I., Merzhanova, G.K., Grigoryan, G.A.* Conditioned Reflex Reactions in High-Impulsivity Rats Are Weaker than Those in Low-Impulsivity Animals // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2020. V. 50. P. 567–574.

## Математическое моделирование инициации и распространения лимбической эпилептической активности в гиппокампе

И.В. Сысоев<sup>1,2</sup>, М.В. Корнилов<sup>1,2</sup>, М.В. Сысоева<sup>1,3</sup>, Л.В. Виноградова<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>3</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>4</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, г. Москва

Современная классификация выделяет довольно много видов эпилепсии [1], от тяжелых форм, таких как височная эпилепсия, до мягких – абсансная эпилепсия [2]. Лимбическая (височная) форма эпилепсии – одна из самых распространенных в мире, первая по частоте среди вторично генерализованных (фокальных) форм [3, 4]. На ЭЭГ приступы выражаются в виде высокоамплитудных, сравнительно регулярных, часто нестационарных колебательных процессов, детектируемых в различных отделах мозга, в том числе в коре больших полушарий, но в первую очередь в лимбической системе: гиппокампе, амигдале и энторинальной коре. Считается, что именно патологическая организация сетей гиппокампа ответственна за генерацию эпилептического ритма [5], который с течением времени может проникать в другие отделы лимбической систем и за её пределы, синхронизируя нейроны вне его пределов и приводя к судорожным состояниям.

К настоящему времени накоплены значительные клинические результаты по исследованию лимбической эпилепсии, на основании исследования электроэнцефалограмм и сигналов локальных потенциалов мозга у людей [6] и животных-моделей [7] получено представление о том, как устроены эпилептические нейронные сети. Необходимо сделать следующий шаг в данном направлении – построить математические модели лимбической эпилептиформной активности. Данная работа делает первый шаг в этом направлении.

Развитие лимбических приступов – длинный и нестационарный процесс. Сам по себе эпилептический фокус, вероятно [5], представляет собою скорее не область, а распределённую в гиппокампе сравнительно небольшую сеть нейронов. Пока этот фокус «спит», его наличие сложно диагностировать не только у людей (у них нет никаких клинических проявлений), но и у животных-моделей, так как количество вовлечённых в фокальный контур нейронов очень невелико, а сам фокус скрыт в глубине мозга в гиппокампе. Поверхностная и эпидуральная ЭЭГ не даст никаких результатов, так как способна измерить лишь потенциалы нейронов коры больших полушарий. Внутричерепные записи локальных потенциалов малоинформативны на ранней стадии, поскольку измеряют суммарную динамику слишком большого ансамбля клеток. Измерения потенциалов отдельных нейронов могли бы указать на патологическую динамику, но нейроны фокуса слишком малочисленны и распределены в гиппокампе, что-

бы надеяться попасть в них случайно. Таким образом, предполагается, что фокус может «спать» месяцами (например, после травмы) или даже годами, чтобы когда-нибудь быть вовлечённым в динамику больших сетей. Аналогичные процессы имеют место у крыс-моделей, у которых после первого (строго) эпилептического статуса, вызванного инъекцией пилокарпина [8] или каината [9], может пройти месяц или более до того момента, пока не начнутся спонтанные приступы [10]. Первые измерения эпилептической патологической активности становятся доступны только в результате первичной генерализации, когда эпилептическая активность захватывает уже значительные области гиппокампа и становится доступной для измерения сравнительно крупными электродами. Затем она с каждым следующим приступом находит себе путь всё дальше вдоль мозга, захватывая всё новые структуры лимбической системы, коры больших полушарий и перекидываясь на другую половину мозга.

Постепенное развитие эпилепсии подталкивает нас к тому, чтобы при её моделировании разделить задачу на части. На первом этапе необходимо смоделировать эпилептический фокус – фокальную подсеть, которая должна генерировать устойчивый ритм, иметь возможности как плавной, так и резкой перестройки его частоты (эпилептический приступ может разбиваться на фазы [11] с резким переходом между ними, причём сами фазы также нестационарны), быть легко реализуемой в мозге. На втором этапе моделируется генерализация приступа в лимбической системе путём захвата им других, смежных, сетей гиппокампа. Принципы такого захвата не ясны до сих пор, но большую роль в них могут играть, например, процессы памяти, в которых гиппокамп принимает активное участие. В таком случае образование новых сетей для запоминания и затем их активация при воспоминании может вести к встраиванию эпилептической подсети в нормальные сети и затем к активации этой сети, когда она, обладая постоянным выраженным ритмом, начинает навязывать его смежным подсетям. Третий этап – распространение эпилептической активности за пределы гиппокампа.

Для моделирования рассматривалось кольцо идентичных, связанных однонаправленной связью с запаздыванием нейронов Ходжкина – Хаксли, пример которого для 10 элементов представлен на рис. 1, где нейроны с 10 по 12 использовались для возбуждения колебаний. Уравнение для каждого

нейрона данной системы можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 C \frac{dV_i}{dt} &= I_{stim} - g_{Na} m_i^3 h_i (V_i - V_{Na}) - \\
 &- g_K n^4 (V_i - V_K) - g_L (V_i - V_L) + \kappa_i, \\
 \kappa_i(t) &= \sum_{j=1}^D k_{ij} (1 + \tanh(V_j(t - \tau))), \\
 \frac{dm_i}{dt} &= \alpha_m(V_i)(1 - m_i) - \beta_m(V_i)m_i, \\
 \frac{dn_i}{dt} &= \alpha_n(V_i)(1 - n_i) - \beta_n(V_i)n_i, \\
 \frac{dh_i}{dt} &= \alpha_h(V_i)(1 - h_i) - \beta_h(V_i)h_i,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $D$  – число элементов в кольце,  $\tau$  – время запаздывания в связях. Индивидуально (в отсутствие связей) все нейроны находятся в неколебательном режиме. Колебания в сети становятся возможны при наличии связей. Колебательный аттрактор (цикл) возникает «жёстко» при определённых значениях коэффициентов связи  $k_{i,j}$  и сосуществует с аттрактором в виде неподвижной точки. Временные ряды колебаний, приведённые на рис. 2, построены при  $k_{i,j} = 40 \forall i \neq j$ . Для попадания на цикл необходимо подать внешнее воздействие и вытолкнуть туда систему, например с помощью кратковременного импульса от внешнего нейрона. В нашем случае использовалась дополнительная сеть из 3 или более нейронов, первый из которых (нейрон № 12 на рис. 1) находился в колебательном режиме.

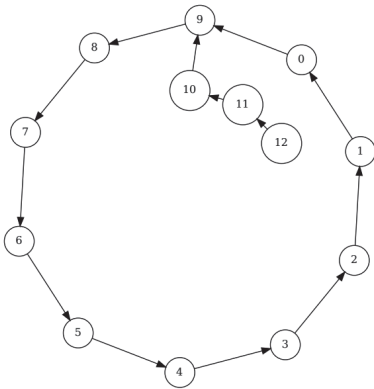


Рис. 1. Пример схемы связей для кольца из 10 нейронов Ходжкина – Хаксли, генерирующей основной ритм колебаний

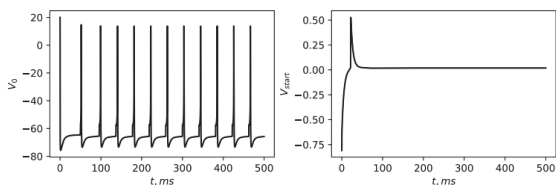


Рис. 2. Зависимости потенциала  $V$  от времени для стартового нейрона № 12 (справа) и нулевого (наиболее удалённого по кольцу от стартового) нейрона сети (слева)

Из рис. 2 видно, что в кольце возбуждаются периодически колебания. Важно, что частота этих колебаний  $f$  определяется суммарным запаздыванием в сети, то есть комбинацией двух параметров: запаздывания в синаптических связях  $\tau$  и числа нейронов  $D$ . Таким образом, варьируя число нейронов в кольце или синаптическое запаздывание, можно получать различные частоты колебаний, как это показано на рис. 3.

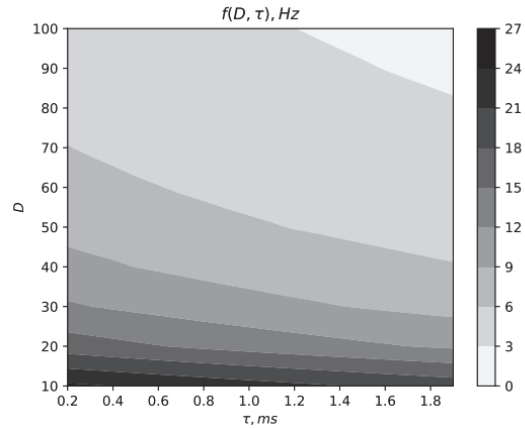


Рис. 3. Зависимость частоты колебания в кольце  $f$  от числа нейронов  $D$  и времени запаздывания в синапсе  $\tau$

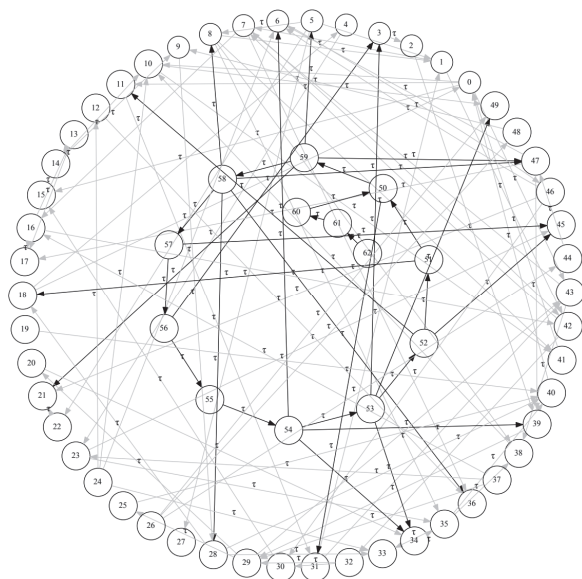
Частотно-временной анализ сигналов внутричерепных записей локальных потенциалов показывает, что основная частота колебаний при лимбической эпилепсии лежит в пределах от 30 Гц в начале приступа до 2 Гц в конце [7, 11]. Как видно из рис. 3, представленная модель способна воспроизвести эти значения частоты.

Чтобы смоделировать первичную генерализацию приступа в гиппокампе, мы рассмотрели большую сеть из 50–100 нейронов, идентичных ранее использованным при моделировании фокального контура. Они были обозначены как «основная область гиппокампа». Все они индивидуально находились в подпороговом состоянии, но при связывании случайными связями (было проанализировано 200 случайно сгенерированных вариантов) демонстрировали нерегулярную динамику в большинстве узлов при тех же значениях  $k_{i,j}$  и  $\tau$ . Далее эти модельные нейроны были связаны с фокальными односторонними связями – только из фокальной области в основную, один из примеров показан на рис. 4.

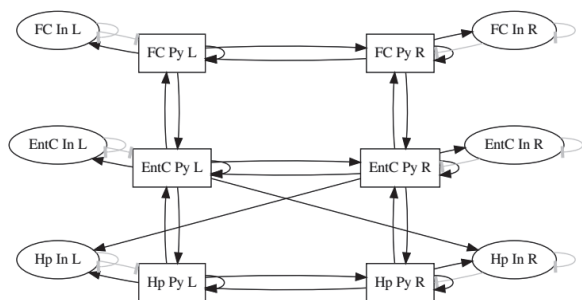
Рассмотрение сетей, подобных приведённой на рис. 4, показало, что при некоторой структуре связей существуют режимы, когда все или большинство осцилляторов в сети синхронизируются по фазе или со сдвигом с сигналом из фокального контура. Такие режимы могут быть рассмотрены как модель эпилептиформной активности, генерализованной в пределах гиппокампа.

Дальнейшее моделирование ставит целью учесть влияние интернейронов и включить в модель энторинальную кору и лобную кору больших полушарий. Принципиальная схема такой модели представлена на рис. 5. Эта схема существенно

сложнее аналогичных схем эпилептогенеза, ранее составленных для абсансной эпилепсии, например в работе [12], и её реализация, по-видимому, требует некоторых промежуточных этапов.



**Рис. 4.** Примерная схема связей между нейронами основной части гиппокампа (внешний круг), фокального контура (внутренний круг) и несколькими периферическими нейронами, запускающими колебания в фокальном контуре



**Рис. 5.** Схема связей в гиппокампе (Hp), энторинальной коре (EntC) и лобной (моторной) коре (FC) больших полушарий между пирамидами (чёрные стрелки) и интернейронами (серые стрелки). Учтены как внутриполушарные, так и межполушарные связи

Данная работа была выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 19-72-10030.

## Литература

1. Avakyan G.N., Blinov D.V., Lebedeva A.V., Burd S.G., Avakyan G.G. Epilepsy and paroxysmal conditions // ILAE classification of the epilepsies: the 2017 revision and update. 2017. V. 9(1). P. 6–25.
2. Вольнова А.Б., Ленков Д.Н. Абсансная эпилепсия: механизмы гиперсинхронизации нейронных ансамблей // Медицинский академический журнал. 2012. Т. 12, № 1. С. 7–19.
3. Engel J. Can we replace the terms “focal” and “generalized” // Generalized Seizures: From clinical phenomenology to understanding system and networks / ed. by E. Hirsch, F. Andermann, P. Chauvel, J. Engel, F. Lopes da Silva, H. Luders. Montrouge: John Libbey Eurotext. 2006. P. 305–325.
4. Blume W.T. Focal and Generalized: Both Here and There // Epilepsy Currents. 2010. V. 10(5). P. 115; doi: 10.1111/j.1535-7511.2010.01375.x.
5. Paz J., Huguenard J. Microcircuits and their interactions in epilepsy: is the focus out of focus? // Nature Neuroscience. 2015. V. 18. P. 351–359; doi: 10.1038/nn.3950.
6. Spencer S. Neural Networks in Human Epilepsy: Evidence of and Implications for Treatment // Epilepsia. 2002. V. 43(3). P. 219; doi: 10.1046/j.1528-1157.2002.26901.x.
7. Bertram E.H. Functional Anatomy of Spontaneous Seizures in a Rat Model of Limbic Epilepsy // Epilepsia. 1997. V. 38(1). P. 95; doi: 10.1111/j.1528-1157.1997.tb01083.x.
8. Чепурнов С.А., Чепурнова Н.Е., Редкозубова О.М., Саакян С.А. Status epilepticus – новые механизмы и пути торможения (литий-пилокарпиновая модель) // Успехи физиологических наук. 2005. Т. 36, № 1. С. 68–84.
9. Мальков А.Е., Шевкова Л.В., Латышкова А.А., Кичигина В.Ф. Ритмическая активность гиппокампа и энторинальной коры нарушается на модели каинатной нейротоксичности у крыс в свободном поведении // Журнал высшей нервной деятельности. 2020. Т. 70, № 3. С. 394–410.
10. Егорова Е.В., Дмитренко Д.В., Усольцева А.А., Иптышев А.М., Шнайдер Н.А., Насырова Р.Ф. Моделирование хронической эпилепсии на животных с помощью химических методов // Бюллетень сибирской медицины. 2019. Т. 18(4). С. 185–196; doi: 10.20538/1682-0363-2019-4-185-196.
11. Sysoev I.V., Perescis M.F.J., Vinogradova L.V., Sysoeva M.V., van Rijn C.M. Directional functional coupling during limbic seizures in rats revealed by nonlinear Granger causality // Russian Open Medical Journal. 2018. V. 7(4). Art. e0404; doi: 10.15275/rusomj.2018.0404.
12. Suffczynski P., Kalitzin S., Lopes da Silva F.H. Dynamics of non-convulsive epileptic phenomena modeled by a bistable neuronal network // Neuroscience. 2004. V. 126(2). P. 467–484; doi: 10.1016/j.neuroscience.2004.03.014.

## Моделирование эпилептиформной активности

М.В. Сысоева<sup>1,2</sup>, Т.М. Медведева<sup>1,3</sup>, Н.М. Егоров<sup>1,2</sup>, А.А. Капустников<sup>1,4</sup>, И.В. Сысоев<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Саратовский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.

<sup>3</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва

<sup>4</sup>Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Моделирование процессов, происходящих в биосистемах, можно разделить на два этапа: обратное моделирование, то есть анализ экспериментальных данных, и прямое моделирование, то есть синтез математических моделей. Как правило, эти два этапа выполняются разными научными коллективами, так как необходим разный математический аппарат.

К настоящему времени для пик-волновых разрядов (ПВР), которые являются характерным проявлением приступов абсансной эпилепсии на электроэнцефалограммах, этап обратного моделирования в основном нами пройден. Эти работы были выполнены на разных наборах экспериментальных данных.

В работах [1, 2] использовались записи внутричерепной ЭЭГ (потенциалы локального поля, LFP), сделанные из лобной доли коры (FC, [AP 2; L 2.5]) и затылочной доли коры (OC, [AP -7; L 6]), а также из таламуса: вентропостериального медиального таламического ядра (VPM, [AP -3.5; L 2.5; H 7.2]) и ростральной части ретикулярного таламического ядра (rRTN, [AP -1.5; L 2.2; H 7.2]).

В следующей работе [3] LFP регистрировались из 4, 5, 6 слоёв первичной соматосенсорной коры (SI, [A/P = 0, M/L = -4.6, depth = -2.8 (ctx4), -3.1 (ctx5), -3.6 (ctx6)]) и ядер таламуса: антериального (ATN, [A/P = -1.4 M/L = -1, depth = -6.2]), каудальной части ретикулярного ядра таламуса (cRTN, [A/P = -3.1, M/L = -3.5, depth = -6.6]), ростральной части ретикулярного ядра таламуса (rRTN, [A/P = -1.4, M/L = -1.9, depth = -6.6]), постериального ядра таламуса (PO, [A/P = -3.6, M/L = -2, depth = -5.4]), вентропостериального медиального ядра таламуса (VPM, [A/P = -4.16, M/L = -2.8, depth = -6]).

В работе [4] LFP регистрировались из лобной (FC, [AP +3.5; L -3]), теменной (PC, [AP -1.6; L -4]) и затылочной (OC, [AP -7; L -3.5]) долей коры, а также из гиппокампа (Hr, [AP -3.5; L +2, depth = -3]).

Исходя из полученных на экспериментальных данных результатов, было сделано предположение о наличии процессов инициации, поддержания и, возможно, прекращения эпилептических разрядов, которые на графике зависимости улучшения прогноза (количественная мера оценки связанности систем, также известная как причинность по Грейнджеру [5]) от времени  $PI(t)$  выглядят как на рис. 1. Процесс инициации разряда – резкое кратковременное увеличение связанности между исследованными областями мозга до начала ПВР. Процесс, отвечающий за поддержание разряда, –

резкое увеличение связанности в начале разряда и резкое падении связанности в конце разряда. Процесс прекращения разряда – либо завершение процесса поддержания разряда, либо самостоятельный процесс, выразившийся в резком кратковременном увеличении связанности в таламокортикальной системе перед окончанием разряда.

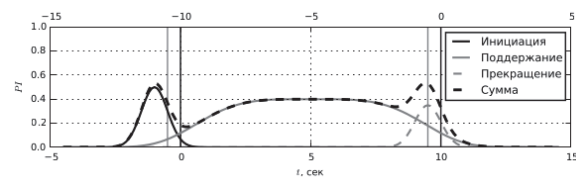


Рис. 1. Схема процессов инициации, поддержания и завершения разряда. Чёрная сплошная линия – процесс, отвечающий только за инициацию ПВР, серая сплошная линия – процесс, отвечающий только за поддержание ПВР, серая пунктирная линия – процесс, отвечающий только за прекращения ПВР, чёрная пунктирная линия – сумма всех трёх процессов

Эти процессы не проявляются в сигналах, снимаемых с отдельных структур мозга, в том числе их сложно обнаружить визуально, поэтому предполагается, что они проявляются только во взаимодействии между различными структурами. При этом в некоторых парах отведений могут иметь место как отдельные процессы, так и разные их сочетания.

В работе [2] процесс инициации ПВР был выявлен за несколько секунд до начала разряда во взаимодействии между всеми зарегистрированными областями мозга, за исключением интраталамической пары (rRTN-VPM). Этот процесс начался в разные моменты относительно начала ПВР для разных пар каналов. Затем, сразу после начала ПВР, наблюдалось временное снижение связанности. Процесс поддержания (первые несколько секунд ПВР) сопровождался сильными взаимодействиями внутри таламуса и увеличением воздействия со стороны всех рассматриваемых областей мозга к OC и rRTN. Взаимодействие таламуса и затылочной коры с лобной корой и влияние коры на VPM выявлялись ниже фонового уровня. При окончании ПВР было обнаружено, что таламокортикальные взаимодействия быстро возвращаются к исходному уровню, т.е. на этом наборе данных не было обнаружено отдельного процесса прекращения.

В работе [3] получены следующие результаты: процесс инициации ПВР характеризовался ранним преиктальным увеличением связанности внутри слоев соматосенсорной коры. Многие па-



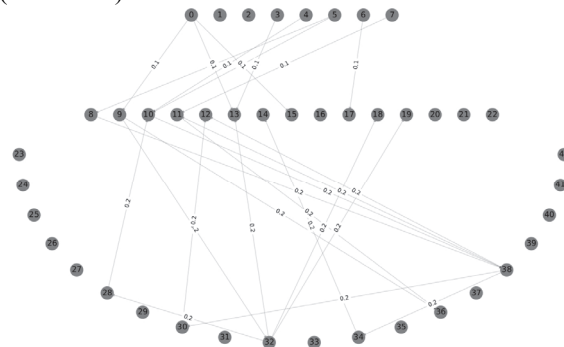
ры каналов показали временное падение связанности сразу после начала ПВР. Процесс поддержания ПВР начался с кортикального (ctx5, ctx6) воздействия на cRTN менее чем через 1 с после начала разряда. Таким образом, cRTN работал как передатчик, сразу же начиная управлять PO и ATN (также < 1 с после начала). Немного позже cRTN начал взаимодействовать с таламическими ядрами: PO, VPM, ATN (появилось двунаправленное взаимодействие). Также появились внутрикорковые связи, и все корковые слои начали управлять ATN. В течение первых 3 с разряда не было воздействия со стороны таламуса на кору головного мозга. Процесс завершения ПВР можно увидеть во всех парах rRTN ↔ кора. Во время второй половины разряда кора головного мозга управляла rRTN. Когда rRTN отреагировал на эту связь, разряд прекратился, скорее всего, через контур отрицательной обратной связи.

В работе [4] процесс инициации ПВР характеризовался ранним преиктальным (от 3,1 до 1,8 с до начала ПВР) увеличением связи между лобной, теменной и затылочной областями коры головного мозга. Раньше всего усиление воздействия определяется со стороны лобной на теменную долю коры, а затем, вскоре после этого, в противоположном направлении. Сразу после регистрируемого физиологами начала ПВР наблюдается общее падение связанности ниже фонового уровня для всех зарегистрированных в этом эксперименте структур мозга. Гиппокамп незначительно участвует в инициации приступов, но не участвует в поддержании или прекращении ПВР.

В работе [6] была сделана попытка прямого моделирования процессов, ответственных за протекание абсансного разряда, с помощью математических макромасштабных моделей, когда каждая отдельная структура мозга моделируется отдельным осциллятором. В качестве отдельных элементов брались осцилляторы с жёстким возбуждением и потенциалом Тоды и осцилляторы Рёсслера. Анализировались пары однонаправленно и двунаправленно связанных осцилляторов обоих типов: рассматривались пары однотипных осцилляторов (например, изучалось взаимодействие двух систем Рёсслера) и пары разнотипных осцилляторов (например, взаимодействие системы Рёсслера с системой с жёстким возбуждением и потенциалом Тоды). Эти макромасштабные модели были способны демонстрировать два различных режима колебаний. Первый представлял собой низкоамплитудные колебания со сложным спектром, сходные с фоновой динамикой. Второй – высокоамплитудные колебания с явным пиком в спектре и наличием кратных гармоник, сходные с ПВР. Переходы между нормальной активностью и патологической моделировались за счёт изменения силы связи или за счёт изменения параметров самих осцилляторов. Одна из моделей (осциллятор Рёсслера) демонстрировала затягивание потери устойчивости: явление, когда изменение формы и амплитуды сигнала, а также его спектральных характеристик может существенно (на десятки

периодов колебаний) запаздывать по отношению к изменению оператора эволюции или силы связи. Таким образом проверялось, способен ли наш подход [1] к анализу связанности систем выявить истинный момент изменения оператора эволюции (или силы связи), либо он только реагирует на изменение амплитуды и формы колебаний.

Далее в работе [7] была построена математическая стохастическая мезомасштабная модель (СММ) запуска абсансных разрядов. В ней каждый модельный «нейрон» фактически является группой расположенных рядом однотипных нейронов, имеющих общее назначение. Модель организована в два уровня (рис. 2). Первый (верхний) уровень состоит из трёх элементов: входной слой, представленный тройничным нервом, второй элемент – группа таламических нейронов (не разделенная на возбуждающую и тормозящую популяции, поэтому нельзя сказать, какое конкретно ядро таламуса моделируется этой структурой), третий элемент – соматосенсорная кора. Второй (нижний) уровень – это уровень отдельных нейронов, принадлежащих к одной из трёх моделируемых структур. Каждый нейрон может быть связан с другими нейронами в модели по следующему правилу: тройничный нерв (внешний вход) влияет на нейроны таламуса; таламические нейроны влияют на нейроны соматосенсорной коры; корковые нейроны влияют на другие нейроны соматосенсорной коры и нейроны таламуса. В большинстве случаев использовалось 32 периферических, 60 таламических и 80 корковых нейронов (всего 172).



**Рис. 2.** Структурная схема стохастической мезомасштабной модели. Различные уровни показывают различные структуры нейронов: верхний – периферические, средний – таламические нейроны, нижний – нейроны неокортекса. Направленная связь показана в виде линий; стрелка на конце линии обозначает направление связи

Моделировался только процесс инициации разряда, описанный в [1]. Нормальная и эпилептиформная активности моделируются как два сосуществующих аттрактора. Нормальной активности соответствует положение равновесия (устойчивая точка), возмущаемое динамическим белым шумом. Эпилептиформной активности соответствует цикл. Переход к патологической активности осуществляется за счёт кратковременного импульсного воздействия. Переход к нормальной активности осуществляется случайно за счёт ди-



намического шума, выбрасывающего траекторию из узкого бассейна притяжения цикла. Для моделирования нейронов каждого типа использовалось уравнение Фитц-Хью – Нагумо [8] в форме [9]. Параметры всех нейронов, кроме нейронов внешнего входа, были зафиксированы таким образом, что каждый осциллятор находился в подпороговом неколебательном режиме:

$$\begin{aligned} \dot{u}_i(t) &= u_i(a - u_i)(u_i - 1) - v_i + \xi_i + \sum_j C_{ij} h(u_j(t - \tau)), \\ \dot{v}_i(t) &= bu_i - \gamma v_i, \\ h(u) &= \frac{1 + \tanh(u)}{2}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $u$  и  $v$  – переменные, качественно соответствующие трансмембранному напряжению и переменной активации ионного тока соответственно,  $a = 0,8$ ,  $b = 0,008$ ,  $\gamma = 0,0033$ ,  $\xi$  – это белый гауссовский шум с нулевым средним и дисперсией, равной 0,07,  $C$  – матрица связей между нейронами, в которой номер строки соответствует ведомому нейрону, а номер столбца – воздействующему. Матрицы связи были сгенерированы случайным образом с помощью следующего набора условий: нейроны таламуса получают входные сигналы от тройничного нерва и посылают свои проекции на нейроны в коре. Нейроны коры могут быть связаны с несколькими другими кортикальными нейронами и с нейронами в таламусе. Значение коэффициентов связи (ненулевых элементов  $C$ ) было равно 0,1 для связей от внешнего входа к нейронам таламуса и 0,2 во всех остальных случаях.

В этой модели была реализована синаптическая связь через гиперболический тангенс. Время запаздывания  $\tau$  в связи было выбрано для каждой матрицы индивидуально в диапазоне от 5 до 15 единиц безразмерного времени и было одинаковым для всех связей внутри одной матрицы.

В работе [10] была построена математическая динамическая мезомасштабная модель (ДММ). Для отдельного узла вновь была использована модель Фитц-Хью – Нагумо в форме (1), параметры брались те же, только временная задержка, соответствующая времени синаптической проводимости между нейронами, была разной для разных матриц и была установлена равной 9–13 точкам (приблизительно 2,6–3,84 мс в перенормированном времени). Основное отличие ДММ от СММ в том, что она обеспечивает как нормальную, так и патологическую динамику с помощью архитектуры связи, шум не нужен для получения нормальной динамики, поэтому все вычислительные эксперименты полностью воспроизводимы. Таламус в этой модели разделён на вентропостеромедиальное ядро таламуса (VPM, ТС-клетки) и тормозное ретикулярное таламическое ядро (RTN, РЕ-клетки), а сигнал коры является суммой колебаний двух типов кортикальных клеток: пирамидальных (PY) клеток и интернейронов (IN). Кортикальные интернейроны и РЕ-клетки обеспечивают тормозные проекции, включая проекции на другие клетки в той же структуре, в то время как проек-

ции PY- и ТС-клеток являются возбуждающими. Также в ДММ, кроме процесса инициации, был добавлен процесс поддержания, обнаруженный в [2–4].

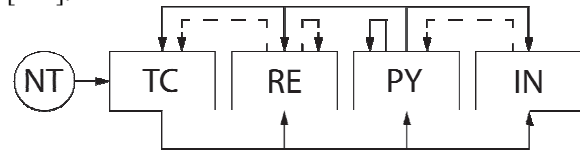


Рис. 3. Структурная схема динамической мезомасштабной модели. Сплошные линии – возбуждающие связи, штриховые линии – тормозные связи

На рис. 3 приведена структурная схема, иллюстрирующая архитектуру связей в предложенной модели. В модели [10] пирамидальных нейронов было 200 штук, таламокортикальных – 120, интернейронов – 50, ретикулярных – 120, тройничного нерва – 10, в сумме – 500 нейронов. Интегральный сигнал нейронов, входящих в популяцию PY и IN, является аналогом сигнала локальных потенциалов первичной соматосенсорной коры (SI), ТС представляет собой совокупность клеток вентропостериального медиального ядра таламуса (VPM), а РЕ – клеток ретикулярного ядра таламуса (RTN). Связи, исходящие из PY и ТС, являются коллатеральными (это означает, что если из PY выходит сигнал, то он обязательно должен прийти и в РЕ, и в ТС; сигнал из ТС приходит в РЕ, IN и PY). Кроме того, в модель были включены нейроны тройничного нерва (trigeminus, NT), поскольку известно, что эпилепсия может возникать в ответ на внешний стимул [11].

Чтобы лучше понять механизмы перехода к эпилептиформной динамике и обратно в ДММ, необходимо было рассмотреть более простую модель, организованную по тем же принципам, например уменьшив число нейронов и упростив уравнения для отдельного узла. В исходной модели из 500 нейронов размерность и число параметров не позволяли провести какой-либо бифуркационный анализ. Поэтому в [12] была создана модель таламокортикальной сети, состоящая всего из 14 нейронов (4 пирамидальных нейрона, 4 таламокортикальных нейрона, 1 интернейрон, 4 ретикулярных нейрона, 1 нейрон внешнего входа), где в качестве отдельного нейрона была использована упрощённая модель Фитц-Хью – Нагумо с одним бифуркационным параметром [13], а связь была линейная:

$$\begin{aligned} \varepsilon \dot{u}_i(t) &= u_i(t) - \frac{u_i^3(t)}{3} - v_i(t) + \sum_j k_{ij} u_j, \\ \dot{v}_i(t) &= u_i(t) + a_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – параметр соотношения временных масштабов, характеризующий относительную скорость активации (деактивации) ионного тока;  $k$  – коэффициент связи,  $a$  – пороговый параметр системы, который может принимать значения от нуля до двух. Значениям  $a > 1$  соответствует возбудимый режим, при котором траектории системы стремятся к устойчивой точке, а значениям  $a < 1$  – автоко-

лебательная динамика (устойчивый предельный цикл на фазовой плоскости), возникающая через суперкритическую бифуркацию Андронова – Хопфа при критическом значении  $a = 1$ .

В работе демонстрируется возможность моделирования ПВР длинными переходными процессами, возникающими вблизи бифуркации рождения цикла из сгущения фазовых траекторий. При этом само возникновение такой бифуркации оказывается возможно вследствие сетевой структуры модели, а не заложено в уравнении для отдельного элемента сети, поэтому можно ожидать, что соответствующие эффекты можно получить и с использованием других моделей для отдельного узла, например Моррис – Лекара или Хиндмарша – Роуз.

Построение моделей в виде радиотехнических схем представляет собой следующий этап решения задачи прямого моделирования эпилептиформной активности. Таким образом можно проверить грубость модельных представлений. Радиотехнические модели неоднократно использовались ранее для моделирования биологических объектов различной природы, в том числе отдельных нейронов и нейронных сетей.

В работе [14] была реализована иерархически организованная сетевая модель части таламокортикальной сети мозга, ответственной за абсансные приступы, в виде имитационной радиотехнической схемы, выполненной на базе программного обеспечения National Instruments Multisim. Количество нейронов было, как и в работе [12], четырнадцать, схемы самих нейронов также описывались упрощёнными уравнениями Фитц-Хью – Нагумо.

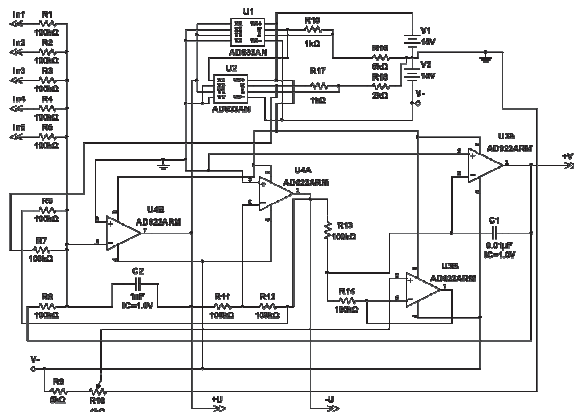


Рис. 4. Принципиальная схема одного упрощённого нейрона Фитц-Хью – Нагумо

На рис. 4 представлена принципиальная схема одного нейрона, разработанная в [15] на основе математической модели, предложенной в [13], и используемая в нашей системе.

В зависимости от параметров сети разряд мог либо не возбуждаться, либо мог захватывать не все нейроны в сети (отсутствие генерализации). Если разряд возбуждался, он представлял собой

длинный переходной процесс, состоявший из близких к регулярным колебаний, и заканчивался спонтанно без каких-либо отдельных механизмов прекращения через некоторое время после окончания воздействия. Подобное поведение является исключительно результатом сетевой организации нейронов в модели и не появляется у одного нейрона.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-00015.

## Литература

1. *Sysoeva M.V. et al.* Application of adaptive nonlinear Granger causality: Disclosing network changes before and after absence seizure onset in a genetic rat model // *Journal of Neuroscience Methods*. 2014. V. 226. P. 33–41.
2. *Сысоева М.В. и др.* Таламо-кортикальные механизмы инициации, поддержания и прекращения пиковолновых разрядов у крыс WAG/Rij // *Журнал высшей нервной деятельности имени И.П. Павлова*. 2016. Т. 66(1). С. 103–112.
3. *Sysoeva M.V. et al.* Dynamics of directional coupling underlying spike-wave discharges // *Neuroscience*. 2016. V. 314. P. 75–89.
4. *Sysoeva M.V. et al.* Changes in cortico-cortical and cortico-hippocampal network during absence seizures in WAG/Rij rats revealed with time varying Granger causality // *Epilepsy&Behavior*. 2016. V. 64. P. 44–50.
5. *Granger C.W.J.* Investigating Causal Relations by Econometric Models and Cross-Spectral Methods // *Econometrica*. 1969. V. 7(3). P. 424–438.
6. *Сысоева М.В. и др.* Моделирование сигналов электроэнцефалограмм крыс при абсансной эпилепсии в приложении к анализу связанности между отделами мозга // *Биофизика*. 2016. Т. 61(4). С. 782–792.
7. *Medvedeva T.M. et al.* Modeling spike-wave discharges by a complex network of neuronal oscillators // *Neural Networks*. 2018. V. 98. P. 271–282.
8. *FitzHugh R.* Mathematical models of threshold phenomena in the nerve membrane // *Bull. Math. Biophysics*. 1955. V. 17. P. 257–269.
9. *Сысоева М.В. и др.* Выбор временных масштабов при построении эмпирической модели // *Известия вузов. ПНД*. 2012. Т. 20(2). С. 54–62.
10. *Medvedeva T.M. et al.* Dynamical mesoscale model of absence seizures in genetic models // *PLoS ONE*. 2020. V. 15(9). Art. e0239125.
11. *Abbasova K. et al.* The role of perioral afferentation in the occurrence of spike-wave discharges in the WAG/Rij model of absence epilepsy // *Brain Research*. 2010. V. 1366. P. 257–262.
12. *Капустников А.А. и др.* Моделирование пиковолновых разрядов в мозге малышами сетями нейроосцилляторов // *Математическая биология и биоинформатика*. 2020. Т. 15(2). С. 138–147.
13. *Dahlem M.A. et al.* Dynamics of delay-coupled excitable neural systems // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2009. V. 19(2). P. 745–753.
14. *Егоров Н.М. и др.* Имитационное моделирование эпилептиформной активности сетью нейроподобных радиотехнических осцилляторов // *Журнал технической физики*. 2021. Т. 91(3). С. 519–528.
15. *Kulminskiy D.D. et al.* Synchronization in ensembles of delay-coupled nonidentical neuronlike oscillators // *Nonlinear Dynamics*. 2019. V. 98(1). P. 735–748.

# Гуманитарный искусственный интеллект

С.А. Терехов

РАНИ, РАИИ, г. Москва; email: alife@yandex.ru

Цель этого очерка – обратить внимание на диспропорцию между применениями методов искусственного интеллекта (ИИ), равно современных и перспективных, в естественно-научных областях и в практике традиционно гуманитарных исследований. Эта диспропорция вызвана не только существенной имманентной логической составляющей технических дисциплин, языком которых уже является математика, но и готовностью и направленностью разработок в области ИИ на технические приложения. При этом и сам ИИ в его классическом определении [1] понимается как специальный раздел алгоритмической математики.

Современные исследования в гуманитарных областях [2, 3] всё шире опираются на экспериментальные методы, характеризующиеся активным направленным воздействием на изучаемую систему либо помещением её в специальные целевые условия. Одновременно возрастает количество совместно наблюдаемых и управляемых параметров. Для сложных комплексных систем их отклик определяется сочетанием нескольких свойств или признаков, что затрудняет использование классических статистических методов проверки гипотез.

Однако не только ограниченность статистических методик и сложности с выполнением условий их применимости сдерживают проникновение ИИ в гуманитарные области. В соответствии со сложившейся к XX веку традицией исследование отделено от последующего статистического анализа результатов. А здесь нужен симбиоз.

В.Г. Буданов [2, с. 136] вслед за Д.С. Чернавским вводит термин «гуманитарная математика». Здесь мы распространяем его еще дальше – до понятия «гуманитарный искусственный интеллект». Речь не идет о междисциплинарном взаимодействии – применении методов науки об искусственном интеллекте в гуманитарных областях. Это – новая форма, в которой интеллектуальная искусственно создаваемая система рождается в процессе исследований в самой среде далеких от техники людей, на уровне интуиции, ассоциаций и аналогий [3].

В обширном арсенале современных методов ИИ имеются подходы, ориентированные на ассоциативный анализ многомерной количественной и качественной информации. Среди них можно выделить две простых, но полноценно работающих технологии, к которым относятся тензорные ассоциативные машины [6, 7] и карты самоорганизации Кохонена [4].

Почему выбраны именно эти два подхода? По мнению автора, именно эти модели основаны на принципах, характерных для, условно, «правополушарного», образно-ассоциативного, если угодно, «гуманитарного» подхода к осмыслению информации. При этом карта Кохонена концентри-

руется на категоризации, обобщении и различении отдельных объектов, а тензорная машина – на связях между объектами в контекстах других ситуаций или объектов.

## Карта ассоциаций Кохонена

Пусть имеется объект, который (в данном контекстном смысле) признан «хорошим», и некоторый произвольный изучаемый объект. Что их отличает? Для ответа на этот вопрос можно прибегнуть к последовательному перебору измеряемых признаков этих объектов. Если мы хотим также отличать объекты от некоторого нежелательного объекта, то мы, возможно, выбираем другие признаки. Теперь, если мы хотим одновременно сравнивать и с хорошим, и с плохим – эти наборы признаков нужно объединить в расширенный набор. При переходе к широкому набору объекты удобнее сравнивать путём вычисления расстояния между векторами, компонентами которых являются значения признаков.

Можно расположить объекты по близости к заданному целевому объекту. Но тогда теряются отношения похожести внутри этого множества объектов. С возрастанием числа референтных объектов исследуемая картина мира усложняется и требуется аналитическая система, способная сохранить всё множество обнаруженных ассоциаций. Одной из таких систем является карта самоорганизации Кохонена [4].

Карта Кохонена располагает объекты так, чтобы отразить степени их сходства с многими референтными объектами и между собой. При этом референтные объекты также автоматически, в процессе самоорганизующего обучения, группируются по их схожести и формируют кластеры. Карта Кохонена – это когнитивная «упакованная» карта кластеров, на которой схожие кластеры являются соседями (рисунок).

Основным активным аналитическим сценарием выступает соотнесение объекта и целевого кластера-категории. Какие признаки их отличают, что нужно изменить для достижения цели?

Почему часто недостаточно просто сравнить два объекта, а требуется прибегать к понятию категория – группа объектов? Дело в том, что сочетания признаков в целевом «хорошем» объекте могут иметь высокий уровень случайности. Соотнесение же с группой происходит по более устойчивым сочетаниям признаков, сохранившимся в обобщенном виде при формировании кластера группы и его носителя – нейрона карты Кохонена.

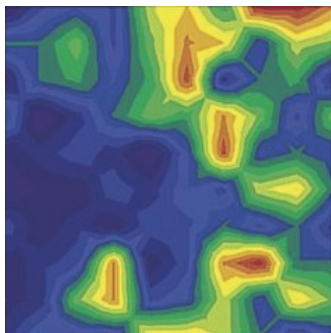
Формирование кластерной структуры и отображение её на когнитивную карту происходит без участия человека, что характеризует этот процесс как относящийся к области ИИ.

На передний план выходит главное достоинство использования такой системы – возможность опираться на огромное число объектов (например, на полный набор корпоративных данных или данных медицинских регистраторов непрерывного действия), причем так же просто, как и в случае небольшого, доступного прямому уразумению, числа объектов.

Ключевое свойство с точки зрения методологии в том, что мыслительный процесс по сравнительному анализу свойств объектов «бесшовно» смыкается с таким же процессом, где вместо мыслительных образов выступают образы-категории, сформированные нейронной системой искусственного интеллекта. Это дает нам право называть такой ИИ гуманитарным.

Почему карта Кохонена глубоко внутренне понятна? Несколько причин:

- объект с его признаками находит свое место путем соотнесения его с другими сгруппированными объектами;
- состав этих групп, т.е. все объекты-прототипы, непосредственно и явно доступен человеку; объекты с их признаками извлекаются по номеру группы-кластера;
- разные группы характеризуются не только перечнем объектов, но и их собирательным образом (нейроном Кохонена); набор и степень выраженности признаков в собирательном нейроне очищены от информационного шума и характеризуют устойчивые образы-категории;
- различные образы-категории располагаются на визуальной когнитивной карте, и поэтому степень их похожести или специфичности видна непосредственно.



Пример карты Кохонена с двумя кластерными островками-категориями сложной формы. Яркость пропорциональна числу примеров в каждом кластере

В чем состоит процесс использования такой карты? Методология весьма общая и допускает разработку и применение разнообразных аналитических методов. Например, в нашей работе [5] построены карты восприимчивости пациентов, страдающих САР (сезонным аффективным расстройством), к терапии на основе индивидуальных психофизиологических признаков и тестов. Пациенты и испытуемые контрольной выборки располагаются на общей карте, формируя кластеры. После применения фототерапии (яркий свет) с ними проводятся новые тесты и анализируется статистика переходов из первичных кластеров во

новь сформированные, для которых подтверждается или не подтверждается эффективность терапии. Такой анализ гетерогенности выборки позволяет выявить *измеряемые до воздействия* признаки групп пациентов, для которых применение терапии целесообразно.

Другая группа приложений относится к области маркетинговых исследований. Карты Кохонена строятся на данных, в которых объектами являются торговые точки, а признаками – показатели их продаж различных товаров. Предметом анализа является новая торговая точка с первичной пробной статистикой продаж. Положение этой точки на карте указывает на её ассоциативную похожесть на группу других объектов, с уже богатой статистикой. Если приписать нейронам карты общеэкономические показатели (как говорят, «раскрасить» карту), то показатели для кластера, к которому принадлежит анализируемая торговая точка, могут использоваться в качестве прогноза её эффективности с учётом неопределённости.

Дальнейший анализ может включать изучение положения торговых точек на карте спустя неделю работы. Это позволяет ответить на вопрос – стабильна ли торговая точка, или переместилась ближе к группе со сниженной эффективностью? Другая возможность – раскраска карты по затраченному времени продавцов. Насколько велика их отдача, как она соотносится с экономической эффективностью? Какие кластеры торговых точек являются проблемными? Можно предложить и множество других способов использования.

В книге основоположника теории самоорганизующихся карт Тойво Кохонена [4] рассмотрены многочисленные примеры из различных областей деятельности.

Теперь о роли аналогии, вырастающей из ассоциации. Наличие ассоциативного поля из категорий объектов допускает или даже предполагает следующий исследовательский шаг. А именно, формирование первичных правил [1] типа «если объект включен в кластер категории А и ассоциативно далек на карте от категории Б, то...». Такие правила могут на первых порах иметь частный характер, но те из них, которые оказываются устойчивыми, могут далее использоваться для формулирования научных гипотез. Это пример «высокого соприкосновения» человека и ИИ – системы по И.Т. Фролову [2, с. 466].

### Тензорная машина ассоциативного вывода

От попарного сходства объектов одной природы перейдем к ассоциациям троек (и более) объектов или ситуаций *разной* природы, включённых в общий контекст. Каждый из объектов-участников сохраняет свою идентичность, однако свойства системы как целого определяются сочетанием взаимных контекстных ассоциаций.

Рассмотрим следующую схему (6W): *Who does What by What, for What, Where and When.*

Здесь каждое из W-слов («кто делает что, при помощи чего, для чего, где и когда») определяет свою смысловую координату или смысловое мно-

жество, причём объекты каждого из (здесь – шести) множеств различны. Анализируемыми единицами являются сочетания по одному объекту из каждого множества. Каждое из наблюдаемых сочетаний оценивается по выбранной шкале (количественной либо чаще – качественной: «ценно» – «бесполезно»). Задача состоит в нахождении сочетаний, имеющих высокую оценку. Какие из объектов и на что нужно заменить в данной проблемной ситуации?

Схемы такого типа являются весьма общими и могут использоваться в очень разных областях, от оптимизации состава химических смесей до управления медицинским персоналом и оборудованием больниц. Например, в природопользовании: «Хозяйство А вносит удобрение Б прямым распылением для снижения кислотности на открытых полях в первой декаде мая». Или в административном управлении: «Муниципалитет запускает автобусный маршрут В автопарка Г для разгрузки станции метро Д на линии Е по пятницам». Набор данных состоит из встретившихся сочетаний с оценкой их предпочтительности.

Такие ассоциативные структуры, включающие несколько размерностей, называют *тензорами* (многомерными таблицами) [6]. Рассмотрим предлагаемый подход описания многомерных ассоциативных связей более формально. Для простоты все элементарные объекты или ситуации будем сопоставлять с их идентификаторами, или «словами».

- Проблемная область или исследуемая система описывается набором из  $D$  словарей («контекстов»), каждая смысловая размерность имеет свой словарь.

- Словари состоят из знаков («слов»). Значимыми являются только сочетания слов из разных контекстов, но не отдельные слова.

- Знаки-слова из контекста с номером  $d$ ,  $d = 1, \dots, D$ , кодируются латентными числовыми векторами  $U_d$  размерностью  $M$ . Компоненты векторов  $U$  определяются в процессе автоматического обучения и обычно не представляют самостоятельного интереса, кроме специального (как, например, весовые коэффициенты нейронных сетей).

- Общая ассоциативная значимость  $\beta$  для контекстной ситуации (сочетания слов) описывается тензорной декомпозицией [6, 7]:

$$\beta \approx B(j_1, \dots, j_D) = \sum_m U_1(j_1, m) \cdots U_D(j_D, m). \quad (1)$$

Симметричные ассоциативные связи соответствуют канонической тензорной декомпозиции [6], определяемой формулой (1). Для моделирования направленных (упорядоченных) ассоциаций может использоваться нейронная сеть «тензорного поезда» (TTNN – tensor train neural network [7]).

На практике могут использоваться тензорные модели малых размерностей (часто 3). Если одна из смысловых размерностей представляет собой дискретное время, то модель образно представляет собой время-контекстную мозаику (ВКМ), в которой объекты вступают между собой в разные сочетания с течением времени.

Так, в одной из задач маркетинга был построен тензор с тремя размерностями: дата, торговая точка и имеющийся в наличии тип товара. Оценкой такого сочетания контекстов являлся наблюдаемый спрос (число продаж). Далеко не все типы товара имелись в разных торговых точках в разные дни, данные характеризовались высоким уровнем разреженности. Тензорная система после обучения [7] оказалась способной восстановить полную картину и оценить потенциал продаж каждого товара в каждой торговой точке.

Две специальные постановки задачи могут представлять особый интерес для приложений.

Если существенна память о «предшествованиях» и текущих контекстах в их единстве, то тензор может включать отдельные размерности как для предыдущих, так и для текущих сочетаний объектов с общей оценкой для последовательности. Тогда при заданном текущем состоянии ассоциативная машина позволяет определить наиболее предпочтительное следующее состояние.

В другом варианте одна из размерностей тензора описывает доступные альтернативы при принятии управляющих решений. Данные представляют собой контекстные ситуации и управляющие решения, которые были приняты ранее (с их оценками). Тогда тензорная машина позволит получить оценку каждого возможного решения в новых контекстах.

Заметим, что значительное число задач адаптации и управления может быть решено без использования сложной рекуррентной логики, только с опорой на ассоциативную (долговременную) память. При этом обучается (адаптируется) именно содержимое памяти, а не логическая функция. Этот подход более устойчив и вычислительно более эффективен, чем, например, глубокие нейронные сети с рекуррентностью.

Такой тип вычислений можно отнести к модели «правополушарного» способа обработки информации [3]. Он эффективно реализуем в описанных тензорных ассоциаторах. Остановимся на некоторых их особенностях.

**Как это учится?** Задача формулируется в виде набора контекстных словарей, сочетания элементов которых определяют конкретную ситуацию, оценка которой вычисляется тензорной машиной. Алгоритм обучается на основе примеров: 1) с учителем – если имеются примеры ситуаций с оценками или измерениями; 2) без учителя – когда примеры имевших место ситуаций отличаются от ситуаций со случайными сочетаниями контекстов; 3) с подкреплением – с использованием одного из контекстов для кодирования управляющих решений в цепочках (сценариях) из ситуаций. При обучении также могут использоваться строгие логические ситуации, которые декларируются как невозможные или, наоборот, достоверные.

**Как это работает?** Тензорная машина пригодна для следующих типовых задач:

- Оценить заданную ситуацию (сочетание контекстов). Сравнить две разные ситуации.



- Заданы все переменные контекстов, кроме одной, управляющей. Выбрать значение для управляющего сигнала с максимальной ожидаемой оценкой.

- Выбрать набор альтернативных сигналов управления с оценками не ниже 95 % от максимальной.

- Задана ситуация. Какой наиболее высокой оценки можно достигнуть, изменив значения одной или двух контекстных переменных?

- В ситуации известны значения большинства контекстов. Найти наиболее вероятные значения для остальных.

- Даны две ситуации – начальная и конечная. Продвигаясь по шагам с изменением не более одной переменной на шаге, достигнуть конечной ситуации с максимальными оценками на промежуточных шагах.

- Где провести следующий эксперимент? Для заданной ситуации какое из значений управляющей переменной имеет наивысшую оптимистичную верхнюю оценку? (УСВ-бандит). Для заданной ситуации выбрать случайное управление, распределённое по вероятности того, что оно оптимально (Томпсоновские выборки [7]).

- Другие задачи оценивания, поиска, управления, оценки риска и принятия решений.

Ассоциативные тензорные алгоритмы могут использоваться в многоагентских системах [1] при моделировании в социологии. Социальная функция простейших роботов реализуется через передачу ими друг другу «семантически осмысленных» (т.е. обученных на множестве сочетаний контекстов из индивидуального опыта) векторных представлений отдельных символов или целых фрагментов своих словарей. Получив такую порцию информации, робот далее может использовать ее для уточнения своих оценок контекстов, а также для дальнейшего самообучения (адаптации векторов в новых контекстах).

Социологические аспекты важны также и при разработке гибридных человекомашинных систем на стыке «эксперт – алгоритм управления». Одна из центральных проблем здесь – это преодоление узких мест при восприятии гуманитарно-образованными людьми математических методов управления. Исторически эта тематика рассматривалась как проблема извлечения экспертных знаний [1, 2] для последующего их использования в отрыве от самого эксперта. Однако сегодня это надо трансформировать в прямую вовлеченность эксперта в принятие управляющих решений математическими методами через создание гуманитарного ИИ.

Гуманитарный искусственный интеллект направлен не на поверхностное упрощение интерфейса взаимодействия, а на полноценный обмен информацией с машиной на высоком, экспертном уровне. Речь идет о новом взаимодействии эксперта-человека и эксперта-машины. Предельная

(самая сложная и спорная) форма такого взаимодействия – это культурный уровень.

В плоскости современной практики желаемым прообразом такого взаимодействия служит следующая ситуация. Пусть в некотором ответственном приложении используется описанная выше тензорная машина ассоциативного вывода. В системе контекстов производится поиск оптимального решения, обладающего наилучшей оценкой, путем выбора «слов» по одной из тензорных переменных, имеющей смысл управления. Значения «слов» по остальным смысловым осям определены конкретной ситуацией и заданы. Часть управляющих слов в данном контексте не применима на уровне «культурных» норм, это известно и человеку и машине. Такие управляющие решения автоматически исключаются. Далее человек, будучи экспертом, исходя из своих знаний, задает ограничения, сужающие множество допустимых управлений. В оставшемся множестве быстрый поиск оптимального управляющего слова производит тензорная машина. Дополнительно она сообщает эксперту, насколько оказался снижен уровень оптимальности вследствие применения экспертных ограничений. Далее диалог человека и машины может быть продолжен.

Подобные системы искусственного интеллекта с ассоциативными вычислениями являются глобальной общественной потребностью, а значит, они должны войти в учебные программы гуманитарных факультетов.

В заключение отметим, что ассоциативные системы являются исходной базой, связующим мостом для следующих уровней ИИ, таких как структурные модели [8] причин и следствий.

## Литература

1. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект: современный подход. М. : Вильямс, 2017. 1408 с.
2. Мир человека: неопределённость как вызов / Институт философии РАН ; ред. Г.Л. Белкина, М.И. Фролова. М. : Ленанд, 2018. 520 с.
3. *Кобринский Б.А.* Аргументация и интуиция в естественном и искусственном интеллекте // VI Нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ'98 : тр. конф. Т. 1. Пушкино, 1998. С. 7–14.
4. *Кохонен Т.* Самоорганизующиеся карты. М. : Бинном, 2008. 655 с.
5. *Вольф Н.В., Лыков В.А., Терехов С.А.* Использование нейронной сети Кохонена для анализа психофизиологических характеристик лиц с сезонным аффективным расстройством // Физиология человека. 1997. Т. 23, № 3. С. 25–29.
6. *Lacroix T., Usunier N., Obozinski G.* Canonical Tensor Decomposition for Knowledge Base Completion // Proc. of the 35th Int. Conf. on Machine Learning. 2018. V. 80. P. 2863–2872.
7. *Terekhov S.A.* Tensor train neural networks in retail operations // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research III. Cham : Springer, 2020. P. 17–24.
8. *Pearl J.* Causality: Models, reasoning, and inference. 2 ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2009. 478 p.

# Динамика распределений суточных микропробуждений у крыс линии WAG/Rij, генетически предрасположенных к абсансной эпилепсии: автоматический анализ ЭКоГ

Р.В. Уколов<sup>2,1</sup>, К.С. Саматова<sup>1</sup>, М.С. Симонян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

<sup>2</sup>Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

Изучение активности мозга, связанной с развитием нейродегенеративных заболеваний, в том числе генетических, очень важно для разработки новых методов лечения и профилактики различных возникающих симптомов. Одним из направлений исследований активности головного мозга при таких заболеваниях является изучение сна [1–3]. В настоящее время сон рассматривается, как некое естественное лечение при развитии токсических поражений или прогрессировании заболеваний, связанных с деменцией [4–8]. Очевидно, что изучение электрической активности мозга во время сна у животных с выраженными генетическими нарушениями, в частности у животных с эпилептическим фенотипом, вызывают интерес к дальнейшим исследованиям в области нейродегенеративных заболеваний. Настоящая работа связана с использованием автоматизированных алгоритмов обработки электрокортикограммы для выделения характерных состояний у грызунов (сон/бодрствование) и использованием полученных результатов для выявления особенностей возникновения микропробуждений (МА) во время сна на суточных записях у крыс линии WAG/Rij, генетически предрасположенных к абсанс-эпилепсии.

Использование математических методов и цифровых технологий для исследования и автоматической обработки биомедицинских систем – одно из направлений развития междисциплинарной науки [9–11]. До сих пор наиболее дешевым, накладывающим слабые ограничения на обычную активность животного/человека и активно используемым в биомедицинских, нейрофизиологических и психометрических работах является электроэнцефалография (ЭЭГ), электрокортикография (ЭКоГ) [12, 13]. Этот метод регистрации мозговой активности применяется как поверхностно (в основном в исследованиях на людях), так и инвазивно (у различных животных и пациентов, состояние которых требует нейрохирургического вмешательства). Автоматическая обработка данных электрической активности мозга является основой для развития современных нейроинтерфейсов устройств и источником объективной информации об особенностях функционирования различных областей мозга [11, 14–17]. В то же время сигналы ЭЭГ и ЭКоГ сложно анализировать из-за многочастотной структуры и крайне неустойчивой динамики из-за самого характера активности структур мозга, объединяющих большие ансамбли нейронов, и особенности метода регистрации суммарного сигнала от значительной области коры головного мозга [18, 19]. Кроме того, обработка

этих сигналов является весьма сложной в присутствии огромного количества помех и шумов искусственного и физиологического характера, которые на практике нельзя четко отличить от полезного сигнала по амплитуде или спектральной характеристике [20, 21].

В рамках проводимых исследований в данной работе использовались экспериментальные данные, полученные для 5 взрослых крыс-самцов линии WAG/Rij, генетически предрасположенных к абсанс-эпилепсии. Эксперименты проводились в Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва, Россия). Всем животным имплантировали винтовые электроды, расположенные на корковой поверхности над лобной областью (симметрично в левом и правом полушарии, AP +2; L ±2) и затылочной областью (справа, AP –6; L 3). Координаты даны относительно брегмы. Электрокортикографические записи (ЭКоГ) выполнялись в свободном поведении с использованием PowerLab 4/35 (ADInstruments). Рутинная запись ЭЭГ длилась от 18 до 22 часов в полосу частот 0,5–200 Гц с оцифровкой 400 с/канал.

У большинства крыс линии WAG/Rij (3 из 5 животных) на ЭКоГ наблюдались типичные для абсансной эпилепсии спайк-волновые разряды (SWD). SWD возникали спонтанно в состоянии пассивного бодрствования и сна и не были связаны с изменениями поведения (типичное состояние «отсутствия»).

Для определения стадий сна/бодрствования в данной работе был использован автоматизированный алгоритм, предложенный в работе [22]. В основе алгоритма определения стадий сна/бодрствования по данным ЭКоГ для грызунов лежит частотно-временной анализ на каждом временном шаге с использованием непрерывного вейвлетного преобразования [18, 19, 23]. Далее кратко приведено описание данного алгоритма.

Запись временного сигнала электрокортикограммы  $x(t)$  длительностью  $T$  с частотой дискретизации  $(1/N)$ , т. е. при регистрации 1 с в записи  $x(t)$  присутствует  $N$  значений. Для сигнала  $x(t)$  выполняется расчет НВП  $W(x, t)$  согласно [18] с использованием морле-вейвлета в качестве базисного с параметром  $\Omega_0 = 2\pi$ , обеспечивающим возможность использования при анализе частоты  $f$  классического фурье-преобразования [23].

В каждый момент времени  $t$  для частотного диапазона  $\Delta f_i$  [15, 18] рассчитываем суммарную мгновенную энергию НВП

$$E_{\Delta f}(t) = \sum_{f \in \Delta f} E(f, t) = \sum_{f \in \Delta f} W(f, t)^2. \quad (1)$$



Вводимое в способе ограничение расчета мгновенной энергии исключительно в ограниченных частотных диапазонах позволяет снизить количество операций и машинное время при анализе экспериментальных данных.

Для каждого момента времени  $t_0$  рассчитываем интегральное значение суммарных мгновенных энергий  $E_{\Delta f}(t)$  НВП в каждом частотном диапазоне  $\Delta f_{1-4}$  согласно выражению

$$\varepsilon_{\Delta f}(t_0) = N \cdot \Delta t \cdot \sum_{t_1}^{t_2} E_{\Delta f}(t), \quad (2)$$

где  $t_1 = t_0 - 0,25 \cdot \Delta t$ ,  $t_2 = t_0 + 0,25 \cdot \Delta t$ , протяженность временного интервала  $\Delta t = 0,5$  с.

Детектирование физиологических состояний сна и бодрствования проводится на основе анализа зависимости  $\varepsilon_{\Delta f_1}(t_0)$ .

В случае наличия регистрации  $M$  сигналов ЭЭГ зависимость  $\varepsilon_{\Delta f_1}(t_0)$  заменяем на аналогичную  $\tilde{\varepsilon}_{\Delta f_1}(t_0)$ . Величины  $\varepsilon_{1\Delta f_1}(t_0) \dots \varepsilon_{M\Delta f_1}(t_0)$  оцениваем для каждого сигнала  $x_1(t) \dots x_M(t)$ . Зависимость  $\tilde{\varepsilon}_{\Delta f_1}(t_0)$  рассчитываем согласно следующей формуле:

$$\tilde{\varepsilon}_{\Delta f_1}(t_0) = (\varepsilon_{1\Delta f_1}(t_0) + \dots + \varepsilon_{M\Delta f_1}(t_0)) / M. \quad (3)$$

Использование большего числа ЭЭГ-записей позволяет улучшить качество определения различных физиологических состояний животного.

Для каждого момента времени  $t_0$  рассчитываем интегральную величину зависимости  $\varepsilon_{\Delta f_1}(t_0)$  по следующей формуле:

$$\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(t_0) \rangle = N \cdot \Delta t \cdot \sum_{t_1}^{t_2} \varepsilon_{\Delta f_1}(t_0), \quad (4)$$

где  $t_1 = t_0 - 0,5 \cdot \Delta t$ ,  $t_2 = t_0 + 0,5 \cdot \Delta t$ , протяженность временного интервала  $\Delta t = 10$  с.

Далее введем пороговые значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  согласно следующим соотношениям, рассчитываемым для всей длительности  $T$  временного ряда  $x(t)$  электроэнцефалограммы:

$$\varepsilon_1 = 1,3 \cdot N \cdot T \cdot \sum_0^T \varepsilon_{\Delta f_1}(t_0), \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = 0,45 \cdot N \cdot T \cdot \sum_0^T \varepsilon_{\Delta f_1}(t_0). \quad (6)$$

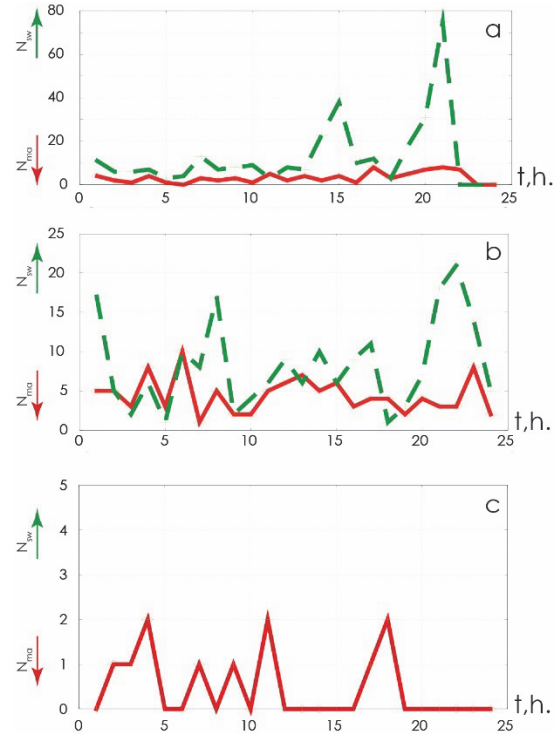
Пороговые значения  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  являются индивидуальными для каждого животного.

Определим временные моменты  $t_0 = tz$ , в которые величина  $\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(t_z) \rangle$  превышает пороговое значение  $\varepsilon_1$ , т. е.  $(\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(t_z) \rangle > \varepsilon_1)$ . Далее находим ближайший временной момент  $t_0 = ts$ ,  $ts < tz$ , в который величина  $\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(t_s) \rangle$  превосходит пороговое значение  $\varepsilon_2$ , т. е. соотношение  $\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(t_s) \rangle > \varepsilon_2$  становится верным. Момент  $ts$  соответствует началу временного интервала сна животного. Моменты времени  $t_0 = ta$ , для которых соотношение  $\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(ta) \rangle < \varepsilon_2$  становится верным, соответствуют моментам начала временного интервала бодрствования животного (и завершения интервала регистрации сна).

Состояние сна диагностируется на временном интервале  $\Delta ts = [ts; ta]$ , на протяжении которого

величина  $\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(t_s) \rangle$  непрерывно превосходит пороговое значение  $\varepsilon_2$ .

Состояние бодрствования диагностируется на временных интервалах  $\Delta ta = [ta; ts]$ , на протяжении которого величина  $\langle \varepsilon_{\Delta f_1}(ta) \rangle$  принимает значения ниже порогового  $\varepsilon_2$ .



Временная зависимость количества паттернов  $N$  со средней частотой от 1,0 до 2,5 Гц для крыс #1 (а), #3 (б) и #5 (с), запись № 1

Таким образом, с использованием описанного выше алгоритма для каждого из 5 животных были определены моменты, когда животное находилось в стадии сна и бодрствования. При этом если стадия бодрствования имела длительность менее 30 секунд, то такое состояние относилось к микропробуждению (МА) животного.

Далее для каждого животного был выполнен статистический анализ и построены зависимости количества микропробуждений (МА) и спайк-волновых разрядов (SWD) для каждого астрономического часа. На рисунке представлены данные зависимости МА и SWD от времени для крыс #1, #3 и #5, стоит отметить, что животное #1 имеет максимальное количество SWD за время проведения эксперимента, у животного #3 минимальное количество SWD, а у животного #5 SWD отсутствовали совсем. При этом, исходя из рисунка не прослеживается очевидная связь между количеством МА и SWD, что говорит о необходимости проведения дополнительных исследований с увеличением количества анализируемых животных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации государственной поддержки молодых российских ученых (проект МД-645.2020.9).

## Література

1. *Gangstad S.W. et al.* Automatic sleep stage classification based on subcutaneous EEG in patients with epilepsy // *Biomedical engineering online*. – 2019. – V. 18, № 1. – P. 1–17.
2. *Shrivastava D. et al.* How to interpret the results of a sleep study // *Journal of community hospital internal medicine perspectives*. – 2014. – V. 4, № 5. – P. 24983.
3. *Tufik S. et al.* Obstructive sleep apnea syndrome in the Sao Paulo epidemiologic sleep study // *Sleep medicine*. – 2010. – V. 11, № 5. – P. 441–446.
4. *Vyazovskiy V.V.* Sleep, recovery, and metaregulation: explaining the benefits of sleep // *Nature and science of sleep*. – 2015. – V. 7. – P. 171.
5. *Ooms S., Ju Y.E.* Treatment of sleep disorders in dementia // *Current treatment options in neurology*. – 2016. – V. 18, № 9. – P. 1–17.
6. *Deschenes C.L., McCurry S.M.* Current treatments for sleep disturbances in individuals with dementia // *Current psychiatry reports*. – 2009. – V. 11, № 1. – P. 20–26.
7. *McCleery J., Sharpley A.L.* Pharmacotherapies for sleep disturbances in dementia // *Cochrane Database of Systematic Reviews*. – 2020. – № 11.
8. *Okawa M. et al.* Circadian rhythm disorders in sleep-waking and body temperature in elderly patients with dementia and their treatment // *Sleep*. – 1991. – V. 14, № 6. – P. 478–485.
9. *Heunis T.M., Aldrich C., de Vries P.J.* Recent advances in resting-state electroencephalography biomarkers for autism spectrum disorder—a review of methodological and clinical challenges // *Pediatric neurology*. – 2016. – V. 61. – P. 28–37.
10. *Fultz N.E. et al.* Coupled electrophysiological, hemodynamic, and cerebrospinal fluid oscillations in human sleep // *Science*. – 2019. – V. 366, № 6465. – P. 628–631.
11. *Quitadamo L.R. et al.* Support vector machines to detect physiological patterns for EEG and EMG-based human–computer interaction: a review // *Journal of neural engineering*. – 2017. – V. 14, № 1. – P. 011001.
12. *Lüthi A.* Sleep spindles: where they come from, what they do // *The Neuroscientist*. – 2014. – V. 20, № 3. – P. 243–256.
13. *Lin M.H.J. et al.* Applying EEG in consumer neuroscience // *European Journal of Marketing*. – 2018. – V. 52, № 1/2. – P. 66–91.
14. *Bell C.J. et al.* Control of a humanoid robot by a noninvasive brain–computer interface in humans // *Journal of neural engineering*. – 2008. – V. 5, № 2. – P. 214.
15. *McFarland D.J. et al.* Prediction of subjective ratings of emotional pictures by EEG features // *Journal of neural engineering*. – 2016. – V. 14, № 1. – P. 016009.
16. *Maksimenko V.A. et al.* Absence seizure control by a brain computer interface // *Scientific Reports*. – 2017. – V. 7, № 1. – P. 1–8.
17. *Bowsher K. et al.* Brain–computer interface devices for patients with paralysis and amputation: a meeting report // *Journal of neural engineering*. – 2016. – V. 13, № 2. – P. 023001.
18. *Hramov A.E. et al.* *Wavelets in neuroscience*. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2015.
19. *Pavlov A.N. et al.* Wavelet analysis in neurodynamics // *Physics-Uspekhi*. – 2012. – V. 55, № 9. – P. 845.
20. *Pander T.* EEG signal improvement with cascaded filter based on OWA operator // *Signal, Image and Video Processing*. – 2019. – V. 13, № 6. – P. 1165–1171.
21. *Agarwal S. et al.* EEG signal enhancement using cascaded S-Golay filter // *Biomedical Signal Processing and Control*. – 2017. – V. 36. – P. 194–204.
22. *Runnova A. et al.* Automatic wavelet-based assessment of behavioral sleep using multichannel electrocorticography in rats // *Sleep and Breathing*. – 2021. – P. 1–8. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11325-021-02357-5>.
23. *Torresani B.* *Continuous wavelet transform* // Savoie. – Paris, 1995. – V. 675. – P. 676.

# Психофизиологическая оценка эффективности психологического консультирования по методике PSY2.0 для коррекции проявлений аллергии разной этиологии

М.А. Филяев<sup>1</sup>, А.С. Буянова<sup>3</sup>, Ю.Б. Тихомирова<sup>1</sup>, Е.В. Еремин<sup>3</sup>, Н.П. Ашина<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Психосоматика 2.0», Москва;

<sup>2</sup> ФИЦ ПНЦБИ РАН Институт биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина Российской академии наук (ИБФМ РАН), Пущино;

<sup>3</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

## Введение

Аллергические заболевания можно определить как патологический иммунный ответ организма на вещества, попадающие на слизистые оболочки или в кровь человеческого организма и классифицированные им как опасные для его выживания. По оценкам Всемирной организации аллергии, около 40 % людей в мире имеет сенсibilизацию хотя бы к одному аллергену [1]. В связи с ухудшающейся экологической обстановкой, изменением пищевых предпочтений человека, информационным воздействием аллергическая сенсibilизация населения будет только возрастать, снижая качество жизни и трудоспособность населения [2].

В настоящее время не вызывает сомнения роль стрессового фактора в распространении аллергических заболеваний [3, 4, 5]. Механизмы влияния стресса на развитие аллергии к настоящему времени известны и заключаются в усилении нейроиммунного ответа на факторы окружающей среды. Процесс запускается активацией паравентрикулярного ядра гипоталамуса и приводит к увеличению продукции кортикотропин-рилизинг-гормона и норадреналина и усилению аллергического воспаления и дегрануляции тучных клеток [2].

Опубликованы данные об успешном применении в лечении аллергического дерматита препаратов из групп нейролептиков, антидепрессантов, транквилизаторов [4–7].

Существуют различия в развитии аллергии при остром и хроническом стрессах: острый стресс является триггером развития аллергии, хронический стресс влияет на регуляцию экспрессии рецепторов глюкокортикостероидов, вследствие чего развивается устойчивость к ним, обострение заболевания и торпидность к терапии [2].

Терапия аллергических заболеваний осуществляется методом применения антигистаминных препаратов второго поколения, системных глюкокортикостероидов, а также, в случае поллинозов, аллерген-специфическая иммунотерапия (АСИТ) [8, 9]. Существующие на сегодняшний день методы лечения служат для купирования клинической симптоматики и в конечном счете для контроля аллергических проявлений, а не лечения заболевания [10].

Ввиду этого все большее количество исследователей настаивают на комплексном подходе к

лечению аллергий, включая в него психотерапевтические методики.

Целью работы является изучение эффективности психологического воздействия по методике PSY2.0, разработанной Михаилом Филяевым [10], на людей с аллергическими заболеваниями различной нозологии. Методика основана на принципах психосоматики и гипнотерапии, а также созданного нами специального клинического протокола – без привлечения фармакологических средств лечения.

Для оценки эффективности в ходе исследования отслеживались изменения количества IgE и IgG, эмоционального состояния, вегетативной регуляции. Объективизация и оценка вегетативной регуляции обеспечивалась телеметрией ритма сердца (ССТРС) [11, 12].

## Материалы и методы

Контрольную и экспериментальную группы составили пациенты с аллергическими проявлениями разной нозологии, подтвержденными справками из поликлиник, при этом респираторная форма аллергии проявлялась примерно у 90 % пациентов в обеих группах. 15 % испытуемых экспериментальной и 30 % контрольной группы принимали антигистаминные препараты на постоянной основе. Выборка составила 79 пациентов: 64 в экспериментальной группе и 15 пациентов в контрольной.

Пациентам экспериментальной группы было проведено по две часовых консультации методом PSY2.0 [13, 14] одним из четырех клинических психологов команды PSY2.0. Участникам контрольной группы консультирование не проводилось.

Для оценки симптомов аллергии и отслеживания изменений их выраженности были проведены анкетирование и опрос участников эксперимента.

Анкетирование проводили по критериям: возраст, социальное положение, профессия, запрос, данные о продолжительности аллергического заболевания, принимаемых лечебных препаратах и сопутствующих заболеваниях.

Опрос участников об их субъективной оценке выраженности симптомов аллергического заболевания проводили спустя 2, 4 и 15 месяцев после проведения психологического консультирования.

Замер количества IgE и IgG в составе клеток крови по общему анализу крови проводился до

первой консультации и спустя месяц после последней консультации.

Эмоциональное состояние оценивалось по шкале тревожности Спилбергера – Ханина [15] и шкале самооценки депрессии Цунга [16]. Первый замер производился у контрольной и экспериментальной группы до консультирования. Второй – после окончания консультаций у экспериментальной группы.

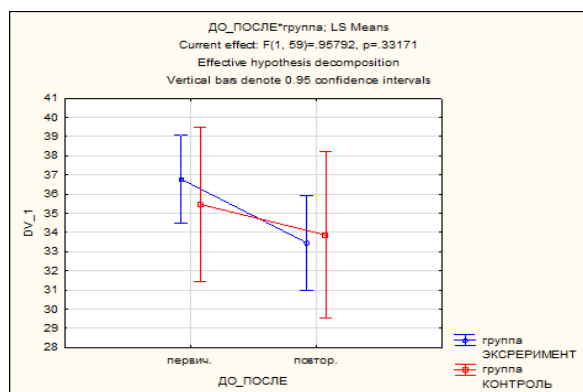
Мониторинг уровня эмоциональной дезадаптации (УЭД) проводился непосредственно перед началом консультирования и сразу после, в среднем и в связи с четырьмя базовыми потребностями («безопасность», «независимость», «достижение», «единение») [17, 18].

Вегетативный компонент функционального состояния клиента оценивался по изменению показателей variability ритма сердца с использованием информационно-телекоммуникационной технологии – ССТРС на базе Интернет-сервиса Stressmonitor (ННГУ). Цифровизация проведена для 3 контекстов: «до сеанса психотерапии», «психотерапия», «после сеанса психотерапии».

Для обработки полученных данных использовался дисперсионный анализ ANOVA (Analysis of Variation). Выборки спектральных показателей variability ритма сердца были подвергнуты углубленному статистическому анализу с использованием программных пакетов Statistica 10.

## Результаты и обсуждение

Оценка эффективности психологического воздействия по методике PSY2.0 по показателям шкалы самооценки депрессии Цунга выявила, что, согласно статистической обработке ANOVA, эмоциональное состояние экспериментальной группы достоверно улучшилось, в отличие от контрольной.



**Рис. 1.** Диаграмма изменений уровня самооценки депрессии в экспериментальной и контрольной группах между первичным и повторным замером

Однако согласно Т-критерию Уилкоксона достоверное улучшение эмоционального состояния наблюдалось в обеих группах. Этот факт не позволяет нам в полной мере связать данные эффекты с воздействием сессий.

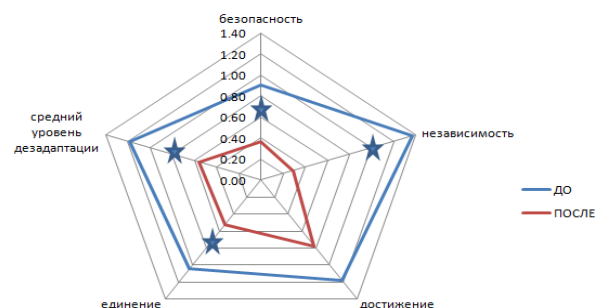
Оценка показателей ситуативной и личной тревожности по шкале тревожности Спилберге-

ра – Ханина выявила достоверные различия между контрольной и экспериментальной группами до начала эксперимента. Это может говорить о связи показателей тревожности с фактом участия в эксперименте.

После прохождения консультаций показатели тревожности достоверно уменьшились. В то время как пациенты, не получившие консультаций, имели тенденцию к повышению ситуативной и личной тревожности. Это может указывать на возможность метода в изменении характера реагирования на стресс.

Чтобы понять взаимосвязь в уменьшении тревожности и улучшении эмоционального состояния с окончанием участия в эксперименте или эффектом от консультирования, необходимо будет провести сравнение между показателями по шкале тревожности Спилбергера – Ханина и шкале самооценки депрессии Цунга контрольной и экспериментальной групп до начала и после эксперимента.

Оценка эффективности воздействия по протоколу PSY2.0 на уровень эмоциональной дезадаптации (УЭД) выявила достоверное положительное влияние как на средний уровень эмоциональной дезадаптации, так и на потребности в безопасности, независимости и единении, что говорит о компенсировании данных потребностей в процессе консультирования. При этом не выявлено достоверных изменений в уровне дезадаптации по потребности в достижении.



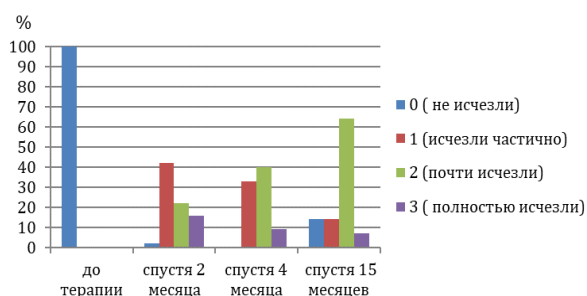
**Рис. 2.** Графическое изображение изменения УЭД до и после проведения психологического консультирования. Звездами отмечены сферы, в которых было выявлено достоверное улучшение показателей

Оценка показателей variability сердечного ритма выявила, что в ходе консультирования происходит снижение напряжения регуляторных систем и растут функциональные резервы. Выявленная динамика вегетативной регуляции обеспечивает снижение адаптационных рисков и оптимизацию функционального состояния участников исследования.

По данным анкетирования участников эксперимента на наличие аллергической симптоматики выявлена положительная динамика, выражающаяся в субъективной оценке снижении аллергических проявлений. Она наблюдалась у 98 % опрошенных участников спустя 2 месяца после последнего консультирования, у 100 % опрошен-

ных – спустя 4 месяца, у 86 % опрошенных (14 человек,  $p$ -value 0,00166) – спустя 15 месяцев.

В среднем произошло уменьшение выраженности ответных реакций на аллерген на 41 %. В то же время не наблюдалось достоверных различий в оценке степени присутствия аллергической симптоматики в период между анкетированием спустя 2 и 4 месяца и в период от 4 до 15 месяцев, что указывает на отсутствие спонтанного излечения от аллергии в текущий период времени. Также мы видим ярковыраженную динамику перехода оценки наличия симптомов аллергии из разряда «исчезли частично» в разряд «почти исчезли». Данная динамика, по-видимому, сохранялась в течение 4 месяцев и даже более года, хотя нам удалось собрать анкетные данные только у трети участников, и мы не можем утверждать этот факт.



**Рис. 3.** Динамика проявления аллергической симптоматики с течением времени, выраженная в изменении процентной доли участников с различной степенью выраженности симптомов

По анкетированию относительно оценки изменения качества жизни участников получены следующие результаты.

В среднем качество жизни опрошенных, по субъективной оценке, изменилось на  $5.8 \pm 2.6$  балла. Согласно опросу изменение качества жизни заключалось в изменениях, оцениваемых опрашиваемыми как положительные, они были связаны со снижением аллергической симптоматики, с положительными изменениями в эмоциональной сфере, а также с реальными изменениями в жизни. Изменение в физическом плане характеризуется участниками как: стало легче дышать, расширился рацион питания, отсутствует аллергия на пыль и на аллергены животных.

Общий анализ крови показал статистически достоверное повышение количества общего иммуноглобулина G в пределах нормы в среднем на 8,9 % у участников экспериментальной группы в отличие от участников контрольной группы, у которой скорее наблюдалась тенденция к его снижению. Способность IgG связываться с аллергеном, предотвращая его соединение с фиксированным в тканях IgE, достоверное изменение количества которого в ходе исследования не обнаружено, является, по мнению исследователей, фактором успешности таких технологий, как АСИТ, целью которых и служит стимуляция синтеза «блокирующих антител», каковыми и являются иммуноглобулины класса G [25].

Для всех вышеперечисленных параметров оценки эффективности консультирования методом PSY2.0 мы определили значение личности психолога. Статистический анализ методом дисперсионного анализа ANOVA показал отсутствие влияния личности психолога на полученные результаты. На основании этого можно сделать вывод, что в течение двух сессий у пациентов не возникает явления трансфера, или переноса, и позволяет нам связать выявленных в исследовании эффектов с техниками и методом, и исключить влияние личности психолога на ход исследования.

## Заключение

В связи с необходимостью коррекции функционального состояния пациентов с симптомами аллергии необходим поиск и оценка методик психологического консультирования на предмет их эффективности и безопасности.

Метод по протоколу PSY2.0 показал свою безопасность, эффективность и независимость от личности психолога в улучшении эмоционального и вегетативного компонентов функционального состояния людей с аллергическими заболеваниями различной нозологии.

Эффективность сессий по протоколу PSY2.0 в борьбе с проявлениями аллергий состоит в повышении количества общего иммуноглобулина G и в субъективной оценке пациентов уменьшения выраженности симптомов. Также с течением времени, после прохождения консультирования, повышается качество жизни.

Эффективность сессий по протоколу PSY2.0 для оптимизации функционального состояния и снижения адаптационных рисков выражается в снижении напряжения регуляторных систем и растущих функциональных резервов.

В ходе сессий по протоколу PSY2.0 снижается средний уровень дезадаптации, компенсируется потребность в безопасности, независимости и единении.

Эффекты, найденные по шкале тревожности Спилбергера – Ханина и шкале самооценки депрессии Цунга, требуют дополнительного изучения, чтобы их можно было связать с воздействием методом PSY2.0 на экспериментальную группу.

Работа выполнена при частичной поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: государственное задание ННГУ им. Н.И. Лобачевского № 0729-2020-0062.

## Литература

1. World Allergy Organization (WAO) White Book on Allergy // Editors Ruby Pawankar, Giorgio Walter Canonica, Stephen T. Holgate, Richard F. Lockey / World Allergy Organization, 2011. P. 11–15.
2. Лусс Л.В. Аллергия сегодня: эпидемиологический вызов и прогнозы на будущее / Компания «Берлин-Хеми / А. Менарини». Медицинский форум XIV Международный конгресс «Современные проблемы иммунологии, аллергологии и иммунофармакологии» // Эффективная фармакотерапия, 2017. Вып. 28. Аллергология и иммунология. № 2. С. 4–6.

3. Gilles S., Akdis C., Lauener R. et al. The role of environmental factors in allergy: A critical reappraisal // *Exp Dermatol*. 2018. 27. P. 1193–1200.
4. Bailey M.T., Kierstein S., Sharma S., Spaitis M., Kinsey S.G., Tliba O., Amrani Y., Sheridan J.F., Panettieri R.A., Haczku A. Allergy and the Nervous System // *J. Immunol*. 2009. 182. P. 7888.
5. Li B., Duan X.H., Wu J.F., Liu B.J., Luo Q.L., Jin H.L., Du Y.J., Zhang H.Y., Cao Y.X., Dong J.C. Impact of psychosocial stress on airway inflammation and its mechanism in a murine model of allergic asthma // *Chin. Med. J. (Engl)*. 2013. 126(2). P. 325.
6. Reinmuth-Selzle K., Kampf C.J., Lucas K., Lang-Yona N., Fröhlich-Nowoisky J., Shiraiwa M., Lakey P.S.J., Lai S., Liu F., Kunert A.T., Ziegler K., Shen F., Sgarbanti R., Weber B., Bellinghausen I., Saloga J., Weller M.G., Duschl A., Schuppan D., Pöschl U. Air Pollution and Climate Change Effects on Allergies in the Anthropocene: Abundance, Interaction, and Modification of Allergens and Adjuvants // *Environ. Sci. Technol*. 2017, Apr 18; 51(8). P. 4119–4141.
7. Damialis A., Traidl-Hoffmann C., Treudler R. Climate Change and Pollen Allergies / Marselle M., Stadler J., Korn H., Irvine K., Bonn A. (eds) // *Biodiversity and Health in the Face of Climate Change*. Springer, Cham. 2019. P. 47–66.
8. Noon L. Prophylactic inoculation against hay fever // *Lancet*. 1911. 177. P. 1572–1573.
9. Насунова А.Ю., Ненашева Н.М. Сравнительная эффективность разных методов аллерген-специфической иммунотерапии у пациентов с поллинозом: открытое рандомизированное испытание // *Российский аллергологический журнал*. 2019. Т. 16, № 3. С. 35–45.
10. Караулов А.В. Место антигистаминных препаратов в терапии аллергического ринита / Компания «Берлин-Хеми / А. Менарини». Медицинский форум XIV Международный конгресс «Современные проблемы иммунологии, аллергологии и иммунофармакологии» // *Эффективная фармакотерапия*, 2017. Вып. 28. Аллергология и иммунология. № 2. С. 9–10.
11. Polevaya S.A., Eremin E.V., Bulanov N.A., Bakhchina A.V., Kovalchuk A.V., Parin S.B. Event-related telemetry of heart rhythm for personalized remote monitoring of cognitive functions and stress under conditions of everyday activity. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 109–115. URL: <https://doi.org/10.17691/stm-2019.11.1.13>
12. Еремин Е.В., Кожевников В.В., Полевая С.А., Бахчина А.В. Веб-сервис для визуализации и хранения результатов измерения сердечного ритма. Свидетельство о государственной регистрации базы данных 2014621202. 2014. Eremin E.V., Kozhevnikov V.V., Polevaya S.A., Bakhchina A.V. Webservice for visualization and storing of heart rate measurements. Certificate of state registration of databases 2014621202. 2014.
13. Филяев М.А. Метод PSY2.0 – ПСИ2.0. Авторский сертификат, серия АС, номер 0011/16/3, реестровый номер АС/16/07/0011/3 // АНО «Агентство правовой информации Человек и Закон». 2016.
14. Филяев М.А., Пыхарева Е.С., Тихомирова Ю.Б., Григорьев А.Е., Родионова А.В., Ашина Н.П. Способ лечения аллергических заболеваний с использованием метода психосоматики PSY2.0 // *Евразийский союз ученых (ЕСУ)* 2020. № 4(73). С. 67–72.
15. Ханин Ю.Л. Краткое руководство по применению шкалы реактивной и личностной тревожности Ч.Д. Спилберга. Л.: ЛНИИФК, 1976. С. 16.
16. Zung W.W.K., Durham N.C. A self-rating depression scale // *Arch. Gen. Psychiatry*. 1965. V. 12. P. 63–70.
17. Григорьева В.Н., Тхостов А.Ш. Способ оценки эмоционального состояния человека. Патент РФ №2291720 С1. 2007.
18. Рунова Е.В., Григорьева В.Н., Бахчина А.В., Парин С.Б., Шишалов И.С., Кожевников В.В., Некрасова М.М., Каратушина Д.И., Григорьева К.А., Полевая С.А. Вегетативные корреляты произвольных отображений эмоционального стресса // *СТМ*. 2013. Т. 5, №4. С. 69–77.



# Классификация объектов в помещениях сверточными сетями на встраиваемом вычислителе

И.С. Фомин<sup>1</sup>, Г.К. Якименко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), Санкт-Петербург; email: i.fomin@rtc.ru

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург; email: yakimenko.gk@edu.spbstu.ru

## Введение

Одной из наиболее распространенных задач в робототехнике является проблема распознавания объектов в области, в которой находится робот. Ее решение актуально для управления роботами как на улице, так и внутри помещения. Определение окружающих робота объектов может быть полезно для вычисления его местоположения, опознавания препятствий, семантического анализа окружающей обстановки, вычисления объектов интереса в окружении для движения к ним и т. д. В качестве робототехнического устройства при решении задачи может выступать мобильный робот, разработанный для разведки местности, сервисный или транспортный робот, перемещающийся по помещениям в соответствии с заданной оператором целью или робот для радиационной разведки, перемещающийся как по открытой местности, так и в помещениях. При условии использования классификации объектов, наблюдаемых камерой, возможно оценить, например, тип помещения, в котором сейчас находится робот. Это позволит, в частности, давать оператору информацию о местоположении робота в семантической форме и использовать для навигации не указание координат, а описание маршрута в нечеткой форме путем указания типа помещений, которые должны быть преодолены для достижения цели маршрута. Безусловно, при использовании такого типа глобальной навигации предполагается, что локальная навигация с объездом статических и динамических препятствий уже реализована.

Под роботом в данной работе предполагается небольшой (около 45×33×14 см) наземный робот для исследования помещений небольшого размера. Это налагает ограничения на устройства, которые могут быть использованы для запуска нейронных сетей. В качестве такого устройства может выступать встраиваемый вычислитель типа Intel NUC, различные нейронные вычислители от компании Intel или специально настроенные ПЛИС, но рассмотрение всех возможных вариантов выходит за рамки этой работы.

Рассмотрена классификация объектов в помещениях с использованием нескольких типов нейронных сетей. В качестве встраиваемого устройства задействованы различные версии Nvidia Jetson для сравнения качества классификации и производительности различных сетей. По этой причине в качестве инструмента для обучения и тестирования сетей используется фреймворк Nvidia-TLТ. Он предоставляет возможность

обучения широкого спектра архитектур нейронных сетей как для классификации, так и для других задач. Кроме того, он разработан специально для обучения сетей при использовании в будущем на Nvidia Jetson и предоставляет алгоритмы оптимизации сетей под конкретное устройство. Для обучения и тестирования использован гибридный набор данных, собранный из открытых наборов данных для классификации объектов в помещениях, изображений, свободно распространяемых в интернете и изображений, собранных непосредственно авторами. В работе будут сформулированы рекомендации по применению различных нейросетевых архитектур для того или иного устройства.

Во второй части работы будут рассмотрены использованные нейросетевые алгоритмы классификации объектов, а также использованные встраиваемые устройства; третья часть посвящена краткому описанию последовательности операций при обучении сетей с использованием Nvidia-TLТ; четвертая часть посвящена описанию набора данных, полученных результатов и формированию рекомендаций по применению различных нейронных сетей на различных встраиваемых устройствах.

## Обзор использованных сетей и устройств

На сегодняшний день использование нейронных сетей различных архитектур для классификации объектов на изображениях является основным способом в подавляющем большинстве случаев. Первые успешные опыты классификации были показаны в работах, посвященных сетям LeNet [1] и AlexNet [2], которые утвердили превосходство сверточных нейронных сетей над полносвязными нейронными сетями и классическими алгоритмами СТЗ в задаче классификации изображений. В дальнейшем взрывной рост числа работ на эту тематику породил группу архитектур, некоторые из них успешно применяются и по сей день. Одной из таких архитектур стала VGG [3], названная по аббревиатуре группы исследователей Visual Geometry Group, в том числе она будет рассмотрена в дальнейшем в экспериментах по классификации. Два основных варианта, известных как VGG-16 (VGG-M в авторском названии) и VGG-19 (VGG-L), отличаются между собой количеством и размером слоев, в первой всего 16 слоев, а во второй, соответственно, 19, и увеличено количество карт признаков даже в тех слоях, которые присутствуют также и в VGG-16.



После этапа движения по пути увеличения качества за счет количества слоев (глубины сети) исследователи достигли плато и перешли к новому подходу. Теперь появлялись дополнительные соединения, за счет которых сигнал мог обойти часть весов, и сети собирались из определенного вида блоков. Так появилась сначала GoogLeNet (или InceptionV1) [4], а когда было показано, что использование таких блоков позволяет увеличивать глубину сети и качество намного сильнее, чем раньше, в новых версиях InceptionV2 и InceptionV3 [5] эти идеи получили свое развитие.

Еще одна архитектура, которая шла тем же путем, но в своем направлении была сеть ResNet [6], которая также получила несколько версий, и в том числе была скрещена с архитектурой Inception. Несколько версий этой сети, используемые в данной работе, описаны в статье [7] и за подробным описанием отличий между сетями следует обратиться непосредственно к ней. Она также получила развитие в виде архитектуры ResNext, также после этого было создано еще несколько интересных архитектур, но, так как они не представлены в составе Nvidia-TLT или не были исследованы, их рассмотрение выходит за рамки этого обзора.

Рассмотрим также встраиваемые устройства, производимые компанией Nvidia для решения различных задач машинного обучения, технического зрения и нейронных сетей. Jetson – это линейка встраиваемых модулей, работающих на базе GPU от Nvidia. Jetson является ведущей встраиваемой платформой для решения задач обработки изображений, видео и искусственного интеллекта. На данный момент линейка Jetson представлена четырьмя моделями устройств: TX1, TX2, Nano и Xavier. TX1 и TX2 – сравнительно дешевые и небольшие модули, появившиеся на рынке встраиваемых устройств уже несколько лет назад, но до сих пор они позволяют с приемлемой скоростью применять нейронные сети для классификации и даже некоторые детекторы. Jetson Nano – относительно недавно появившаяся модель, она позиционируется как устройство, предназначенное для обработки информации сразу, непосредственно рядом с ее источником после получения и оцифровки, единственный истинно рассчитанный на встраивание чип; несмотря на малый размер и небольшое энергопотребление, подходит как для запуска алгоритмов обработки (предобработки) видео, так и для запуска несложных нейронных сетей, оптимизированных в TLT. Модель Jetson Xavier – наиболее мощный встраиваемый модуль, который имеет сравнительно скромные размеры и ограниченное энергопотребление; он подходит для запуска широкого спектра нейронных сетей, вплоть до тяжелых детекторов и сегментаторов, впрочем, ниже будет показана степень эффективности данного устройства при решении задачи классификации. Наконец, для проверки работоспособности обученного решения также проводится тестирование на том же устройстве,

на котором производится обучение (видеокарта GTX 1660 Super).

### Обучение сетей в Nvidia-TLT

Рассмотрим основной порядок обучения нейронных сетей в фреймворке Nvidia-TLT. Перед началом работы пользователь получает в личном кабинете токен для разрешения запуска расчетов, устанавливает и настраивает все необходимые библиотеки, docker-образ Nvidia-TLT с поддержкой видеокарты основной системы изнутри образа. Далее выбирается подходящий задаче скрипт для обучения (классификатор, детектор и пр.), архитектура нейронной сети и предобученные веса из списка доступных (программирование осуществляется в Jupyter Notebook, а выбор происходит в текстовом формате). После выбора предварительно обученной модели и подготовки файлов спецификации для настройки гиперпараметров обучения наступает рабочий этап обучения нейронной сети. На первом шаге рабочего процесса предварительно обученная модель обучается с использованием новых данных, отобранных для решения какой-то конкретной задачи, согласно файлу спецификации.

Во время обучения набор данных может быть искусственно расширен с целью повышения вариативности и получения более точной выходной рабочей модели нейронной сети. TLT содержит следующие инструменты расширения начального набора данных:

- масштабирование изображения,
- увеличение цветового пространства изображения,
- размытие изображения,
- поворот, сдвиг и отражение изображения,
- изменение оттенка, яркости и контраста изображения.

После первого обучения модели и проверки её работоспособности наступает следующий шаг рабочего процесса – обрезка (pruning) модели. Его суть состоит в том, чтобы найти и удалить из модели узлы, не оказывающие существенного влияния на качество работы модели. Этот шаг позволяет значительно повысить производительность нейронной сети, уменьшая затраты на использование памяти вычислительного устройства и увеличивая пропускную способность нейронной сети. После этого в общем случае выполняется преобразование сети таким образом, чтобы при ее вычислении на конечном устройстве все операции выполнялись не в числах с плавающей точкой, а в пространстве чисел INT8. Это позволяет заметно увеличить частоту кадров на тех устройствах, для которых это возможно. Для тех устройств, для которых нет поддержки расчетов в INT8, данный этап опускается.

После экспорта модели на целевое устройство происходит ее сборка с помощью инструментов библиотеки TensorRT [8], а также дальнейшее развертывание и эксплуатация с помощью набора инструментов DeepStream.

## Набор данных

За основу набора данных для классификации был взят набор MS COCO [9], из которого были извлечены изображения тех объектов, которые имеют отношение к помещениям. Из списка полученных изображений были отобраны только те, которые действительно относятся к помещениям и не включают улицу по большей части. Размер некоторых изображений был частично сокращен, так, чтобы видна была только часть комнаты с ограниченным количеством объектов. Кроме того, набор данных был дополнен изображениями, собранными вручную самостоятельно и отсортированных соответственно выбранным классам. Общие характеристики собранного набора представлены в сводной таблице 1. Набор данных для классификации был размечен согласно формату «KITTI format dataset» [10].

Таблица 1

Параметры набора данных		
Класс	Обучающий набор	Тестовый набор
Человек	2860	818
ТВ-монитор	783	115
Стул	402	224
Стол	376	108
Растение	368	106
Диван	354	102

## Эксперименты

Как было сказано ранее, для обучения был использован пакет Nvidia-TLТ. Во-первых, требовалось обучить сети на собранном наборе данных, для чего он был специальным образом подготовлен. Далее в таблице 2 будет приведена средняя нормированная матрица ошибок для нескольких из исследованных сетей.

Таблица 2

Класс	Стул	Стол	Человек	Растение	Диван	ТВ-монитор
Стул	0,76	0,00	0,12	0,00	0,08	0,04
Стол	0,52	0,08	0,32	0,08	0,00	0,00
Человек	0,03	0,02	0,92	0,01	0,01	0,01
Растение	0,05	0,03	0,10	0,82	0,00	0,00
Диван	0,20	0,00	0,00	0,04	0,76	0,00
ТВ-монитор	0,03	0,00	0,03	0,06	0,00	0,88

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что изображения, которые использовались как в процессе обучения, так и в процессе тестирования, имеют ряд особенностей, которые частично влияют на качественные показатели. Изображения в наборе MS COCO содержат зачастую больше одного объекта из классов, которым обучена нейронная сеть, поэтому, как показывает матрица ошибок, часто происходит путаница между классами. В таблице 3 приведены показатели качества работы сети при расчете качества по top-1 классу (т. е. учитывается только класс с наибольшей вероятностью). Там же приведены пока-

затели качества для расчета по top-3, когда классификация считается верной, если хотя бы один из трех первых по вероятности классов совпадает с размеченным классом. Эти показатели существенно выше.

Таблица 3

	ResNet-10	ResNet-50	VGG-19
Топ-1	0,93	0,92	0,92
Топ-3	0,95	0,97	0,95

В процессе влияния обрезки (pruning) избыточных связей выяснено, что некоторые сети существенно теряют в качестве в результате обрезки, некоторые качество сохраняют. В таблице 4 приведено сравнение влияния обрезки на различные архитектуры. Исходя из этих данных можно сделать вывод о том, что архитектуры ResNet-18, VGG-16 неразумно подвергать данной процедуре.

Таблица 4

	До обрезки		После обрезки	
	ResNet-18	VGG-16	ResNet-18	VGG-16
Топ-3	0,92	0,89	0,94	0,63
Топ-5	1	0,97	0,97	0,93

Чтобы продемонстрировать, что удалось успешно обучить нейронную сеть для классификации в рамках нового фреймворка, а также для проверки применимости в своих задачах, по итогам экспериментов был собран собственный дополнительный тестовый датасет. Его отличительной особенностью является то, что каждый объект находится не в окружении других: одно изображение – один класс объекта. Всего по 100 изображений на каждый из классов, представленных в таблице 1. Результаты тестирования на этом наборе данных приведены в таблице 5. По этим данным видно, что вне условий сложных изображений качество классификатора позволяет использовать его в задачах классификации объектов в помещениях.

Таблица 5

	Стандартный набор данных		Собственный набор данных	
	ResNet-10	ResNet-18	ResNet-10	ResNet-18
Топ-3	0,91	0,91	0,93	0,92
Топ-5	0,99	0,99	0,99	1

Кроме того, одной из задач было исследование быстродействия работы различных сетей на разных устройствах линейки Jetson. Сводные результаты тестов быстродействия приведены в таблице 6.

По итогам исследования можно сделать вывод, что сети ResNet-10 и ResNet-18 отлично показывают себя на маломощных устройствах Jetson при достойном показателе качества, а архитектуры ResNet-50, VGG-16, VGG-19 требуют существенную вычислительную мощность и требуют для своего запуска устройство типа Xavier, или даже

персональный компьютер с графическим вычислителем.

Таблица 6

	Nano	TX2	Xavier
ResNet-10	76	199	1548
ResNet-18	48	122	755
ResNet-50	-	35	402
VGG-16	-	18	248
VGG-19	-	7	176

### Заключение

По итогам исследования использования платформы Nvidia-TLT для обучения и поставки нейронных сетей для классификации объектов были сделаны следующие выводы. Данный инструмент позволяет обучать классификаторы для использования на встраиваемых устройства. Качество обученного таким образом классификатора в общем случае не уступает другим способам. После обрезки избыточных связей и дообучения отдельные сети теряют в качестве. Быстродействие оптимизированных сетей превышает быстродействие сетей с той же архитектурой, обученных и запущенных на устройствах Jetson через стороннее программное обеспечение (OpenCV). Сформулированы рекомендации по использованию различных архитектур сетей в зависимости от модели устройства Jetson.

В дальнейшем планируется расширить номенклатуру исследуемых сетей на группу сетей для обнаружения объектов, а также проверить полученные результаты на нескольких разных датасетах, чтобы убедиться в независимости сделанных выводов от используемого набора данных.

Работа проводилась в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 075-00913-21-01 «Облачные сервисы автоматического синтеза и валидации наборов данных для обучения глубоких нейронных сетей в задачах распознавания образов».

### Литература

1. *LeCun Y. et al.* Gradient-based learning applied to document recognition // Proceedings of the IEEE. 1998. Т. 86, № 11. С. 2278–2324.
2. *Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E.* Imagenet classification with deep convolutional neural networks // Advances in neural information processing systems. 2012. Т. 25. С. 1097–1105.
3. *Simonyan K., Zisserman A.* Very deep convolutional networks for large-scale image recognition // arXiv preprint arXiv: 1409.1556. 2014.
4. *Szegedy C. et al.* Going deeper with convolutions // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2015. С. 1–9.
5. *Szegedy C. et al.* Rethinking the inception architecture for computer vision // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. С. 2818–2826.
6. *He K. et al.* Deep residual learning for image recognition // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. С. 770–778.
7. *Szegedy C. et al.* Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2017. Т. 31, №. 1.
8. *Settle S. O. et al.* Quantizing convolutional neural networks for low-power high-throughput inference engines // arXiv preprint arXiv:1805.07941. 2018.
9. *Lin T. Y. et al.* Microsoft coco: Common objects in context // European conference on computer vision. Springer, Cham, 2014. С. 740–755.
10. *Geiger A. et al.* Vision meets robotics: The kitti dataset // The International Journal of Robotics Research. 2013. Т. 32, №. 11. С. 1231–1237.

# Когнитивный дефицит переболевших COVID-19: обзор литературы

М.Е. Халак<sup>1</sup>, А.Е. Мазанова<sup>1</sup>, Е.В. Дорофеев<sup>1</sup>, Л.Э. Семенова<sup>1</sup>,  
Е.Д. Божкова<sup>1</sup>, С.А. Полевая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Приволжский исследовательский медицинский университет Минздрава РФ, Нижний Новгород;  
email: m-e-h@yandex.ru

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород;  
email: s453383@mail.ru

В последнее время все чаще в исследованиях поднимается вопрос о когнитивных последствиях новой коронавирусной инфекции. Известно влияние вирусных инфекций на центральную нервную систему, что может приводить к неврологическим нарушениям достаточно широкого спектра: от нарушения когнитивных процессов до аффективных расстройств [1–3]. Имеются данные, что когнитивный дефицит у переболевших COVID-19 может развиваться и сохраняться достаточно длительное время после заболевания, вплоть до года [4].

Нельзя также забывать и о косвенном влиянии ситуации пандемии на общее психологическое здоровье, что требует особого внимания при выстраивании программы реабилитации.

Коронавирусы уже подтвержденно считаются потенциально нейротропными, респираторные коронавирусы могут проникать в головной мозг, цереброспинальную жидкость и длительно там сохраняться, оказывая влияние на белое вещество головного мозга [5–6]. Скорее всего, данные патогенетические аспекты и являются определяющими в проявлении когнитивного дефицита в сочетании с побочными эффектами от препаратов, используемых для лечения COVID-19, а также в зависимости от того, был пациент подключен во время заболевания к ИВЛ или нет.

Анализ опыта предыдущих эпидемий показывает, что около 18 % пациентов, переболевших коронавирусной инфекцией, отмечали снижение концентрации внимания и памяти до 39 месяцев [7]. При этом расстройства когнитивных процессов не зависят ни от возраста пациентов, ни от степени тяжести перенесенного заболевания. Нарушения могут проявляться как у пожилых пациентов, тяжело перенесших инфекцию, так и у более молодых, переболевших COVID-19 в более легкой форме [8–11]. Zhou H. с соавт. в своем нейropsychологическом исследовании анализировали взаимосвязь между различными маркерами воспаления и когнитивными нарушениями [11]. В экспериментальную группу были включены 29 пациентов, перенесших COVID-19 (18 мужчин и 11 женщин, средний возраст – 47,0 ± 10,54 года). Контрольную группу составили так же 29 человек, являвшиеся здоровыми добровольцами (12 мужчин и 17 женщин, средний возраст – 42,48 ± 6,94 года). По результатам онлайн-тестирования участники экспериментальной группы хуже справлялись с предложенными тестами (Continuous Performance Test, СРТ), были более невнимательны и импульсивны ( $p < 0,05$ ).

В проведенном M.S. Woo и соавт. кросс-секционном исследовании сравниваются данные 18 пациентов, перенесших COVID-19 легкой и средней степени тяжести (10 женщин и 8 мужчин, средний возраст – 42,2 года), и 10 сопоставимых по полу и возрасту здоровых добровольцев [10]. Оценка состояния когнитивных процессов проходила примерно через 85 дней после выздоровления при помощи модифицированного телефонного интервью для оценки когнитивного статуса (Modified Telephone Interview for Cognitive Status, TICS-M). В результате выяснилось, что пациенты после перенесенной коронавирусной инфекции имели меньшие средние баллы по итогам интервью, чем участники контрольной группы (оценивалось внимание, беглость речи и память,  $p < 0,01$ ). А вот статистически значимой связи с уровнем эмоциональной дезадаптации, усталостью или длительностью заболевания выявлено не было. Это может свидетельствовать о том, что развитие когнитивного дефицита у испытуемых являлось осложнением после COVID-19.

В октябре 2020 года был опубликован ретроспективный анализ обширных данных когнитивного исследования Great British Intelligence Test, в котором приняли участие 84285 человек в возрасте от 16 лет с подтвержденным диагнозом COVID-19 в анамнезе и подозревавших то, что они переболели [12]. Авторы выявили, что пациенты, перенесшие COVID-19, в дальнейшем имели более низкий общий средний балл при оценке когнитивных функций по предложенным 9 шкалам по сравнению с лицами без подтвержденного диагноза. Кроме того, такие испытуемые показали худшие результаты по тестам, оценивавшим зрительно-пространственные навыки и концентрацию внимания.

Стоит отметить, что в последнее время в исследованиях все чаще упоминается еще один важный симптом, который может свидетельствовать о манифестации COVID-19 – неврологические нарушения, проявляющиеся в виде делирия [8, 13]. Имеются упоминания о значительном ухудшении состояния когнитивных функций пациентов, вышедших из состояния делирия [14]. Однако исследование В.С. McIloughlin и соавт. не подтвердило различий в средних баллах, полученных с помощью модифицированного телефонного интервью для оценки когнитивного статуса через 4 недели после перенесенного COVID-19 между группами пациентов, у которых во время госпитализации развился делирий ( $n = 31$ ) или его не было ( $n = 40$ ). При этом стоит отметить, что авторы не

анализировали состояние когнитивных функций на момент госпитализации пациентов [15].

На текущий момент все чаще стала упоминаться необходимость психологического сопровождения пациентов с COVID-19 уже на этапе раннего восстановления [16]. При этом речь идет не только о коррекции психоэмоционального состояния, но и имеющегося когнитивного дефицита, при этом некоторые исследователи делают акцент на том, что психологическая помощь должна быть оказана всем заболевшим коронавирусной инфекцией. Для работы межведомственных команд по лечению и реабилитации необходимо включение специалиста-психолога. Психолог должен подключаться к восстановительным мероприятиям уже на 1-м этапе реабилитации.

Проведение нейропсихологической реабилитации и когнитивных тренингов должно быть обязательным элементом, который позволит снизить риски дальнейшего развития когнитивного дефицита [17].

Речь также может идти и об организации долгосрочной психологической помощи пациентам для профилактики психосоматических нарушений, расстройств познавательной сферы, а также помощи родственникам с целью предупреждения усиления негативного взаимовлияния.

Нами была разработана программа психологического сопровождения раннего этапа постковидной реабилитации, включающая четыре этапа:

- 1) обзор имеющихся научных данных по заявленной проблеме;
- 2) организация междисциплинарного взаимодействия (включение клинических и нейропсихологов в состав мультидисциплинарной бригады);
- 3) подбор психодиагностического инструментария, необходимого для выявления степени когнитивного дефицита;
- 4) разработка соответствующих когнитивных тренингов по результатам диагностики с учетом специфики имеющихся нарушений у пациентов с COVID-19.

На сегодняшний день работа по преодолению когнитивных нарушений имеет высокую актуальность в виду последствий, влияющих на оптимальное состояние жизнедеятельности и труда. Ценность разработанной программы заключается в возможности масштабирования на районы и регионы страны с возможным включением в имеющиеся рекомендации по реабилитации пациентов с коронавирусной инфекцией.

### Литература

1. Carfi A., Bernabei R., Landi F. Persistent Symptoms in Patients after Acute COVID-19 // JAMA. 2020. 324(6). 603–605. URL: <https://doi.org/10.1001/jama.2020.12603>.
2. Sigfrid L., Cevik M., Jesudason E., Lim W.S., Rello J., Amuasi J. et al. What Is the Recovery Rate and Risk of Long-Term Consequences Following a Diagnosis of COVID-19? A Harmonised, Global Longitudinal Observational Study Protocol. BMJ Open. 2021. 11(3):e043887. URL: <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2020-043887>.

3. De Lorenzo R., Conte C., Lanzani C., Benedetti F., Roveri L., Mazza M.G. et al. Residual Clinical Damage after COVID-19: A Retrospective and Prospective Observational Cohort Study. PLoS One. 2020; 15(10):e0239570. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239570>.

4. Пузова Н.В., Пузов Н.А., Пузов А.В. Когнитивные нарушения у лиц, перенесших COVID-19. Медицинский совет. 2021. (4). 69–77. URL: <https://doi.org/10.21518/2079-701X-2021-4-69-77>.

5. DosSantos M.F., Devalle E., Aran V., et al. Neuromechanisms of SARS-CoV-2: A Review // Front Neuroanat. 2020. Jun 16; 14:37. doi: 10.3389/fnana.2020.00037. eCollection 2020.

6. Egbert A.R., Cankurtaran S., Karpiak S. Brain abnormalities in COVID-19 acute/subacute phase: A rapid systematic review. Brain Behav Immun. 2020. Oct; 89:543–54. doi: 10.1016/j.bbi.2020.07.014. Epub 2020 Jul 17.

7. Rogers J.P., Chesney E., Oliver D., et al. Psychiatric and neuropsychiatric presentations associated with severe coronavirus infections: a systematic review and meta-analysis with comparison to the COVID-19 pandemic // Lancet Psychiatry. 2020; 7(7). 611–27. doi: 10.1016/S2215-0366(20)30203-0.

8. Helms J., Kremer S., Merdji H., Clere-Jehl R., Schenck M., et al. Neurologic features in severe SARS-CoV-2 infection // N. Engl. J. Med. 2020. V. 382(23). P. 2268–2270. Doi: 10.1056/NEJMc2008597.

9. Chaumont H., San-Galli A., Martino F., et al. Mixed central and peripheral nervous system disorders in severe SARS-CoV-2 infection // J. Neurol. 2020. Nov; 267(11):3121–7. Doi: 10.1007/s00415-020-09986-y. Epub 2020 Jun 12.

10. Woo M.S., Malsy J., Pöttgen J., et al. Frequent neurocognitive deficits after recovery from mild COVID-19. // Brain Commun. 2020. Nov 23;2(2):fcaa205. Doi: 10.1093/braincomms/fcaa205. eCollection 2020.

11. Zhou H., Lu S., Chen J., et al. The landscape of cognitive function in recovered COVID-19 patients. // J. Psychiatr. Res. 2020. Oct; 129:98–102. doi: 10.1016/j.jpsychires.2020.06.022. Epub 2020 Jun 30.

12. Hampshire A, Treder W, Chamberlain SR, et al. Cognitive deficits in people who have recovered from COVID-19 relative to controls: An N = 84,285 online study. medRxiv 2020. 10.20.2021. 58–63. doi: 10.1101/2020.10.20.20215863.

13. O'Hanlon S., Inouye S.K. Delirium: a missing piece in the COVID-19 pandemic puzzle // Age ageing. 2020. V.49(4). P. 497–498. DOI: 10.1093/ageing/afaa094.

14. Цой Л.В. COVID-19-ассоциированный делирий: механизмы развития и особенности течения // Медицинский вестник Юга России. 2021. 12(1). 33–37. DOI 10.21886/2219-8075-2021-12-1-33-37.

15. Mcloughlin B.C., Miles A., Webb T.E. et al. Functional and cognitive outcomes after COVID-19 delirium // Eur. Geriatr. Med. 2020. Oct; 11(5). 857–62. Doi: 10.1007/s41999-020-00353-8. Epub 2020 Jul 14.

16. Иванова Г.Е., Шмонин А.А., Мальцева М.Н., Мишина И.Е., Мельникова Е.В., Бодрова Р.А., Цыгунов М.Б., Бахтина И.С., Калинина С.А., Баландина И.Н., Соловьёва Л.Н., Иванова Н.Е., Суворов А.Ю., Дидур М.Д. Реабилитационная помощь в период эпидемии новой коронавирусной инфекции COVID-19 на первом, втором и третьем этапах медицинской реабилитации. // Физическая и реабилитационная медицина, медицинская реабилитация. 2020. 2(2). 98–117. Doi: <https://doi.org/10.36425/rehab34148>.

17. Brugliera L., Spina A., Castellazzi P., et al. Rehabilitation of COVID-19 patients // J. Rehabil. Med. 2020. 52(4):jrm00046. Doi: 10.2340/16501977-2678.

# Исследование применения нейроподобных функций для обработки локационных сигналов

А.Г. Хоботов, В.И. Калинина, А.И. Хилько

Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород

Существование живых биологических объектов, таких как животные, в том числе и человек, предполагает активное их взаимодействие с окружающей средой. Это взаимодействие осуществляется посредством сенсоров различной модальности, которые служат основой для формирования объектов животного мира в модели окружающей среды. Необходимо отметить, что «операционный базис» объектов животного мира – операции, посредством которых обрабатываются сигналы, поступающие с сенсоров, – формируется на основе функционирования пороговых нелинейных элементов – нейронов.

В работе исследовалась возможность реализовать на основе нейроподобных функций локационные функции, в разной степени присущие объектам животного мира. В технике подобные локационные операции принято называть согласованной фильтрацией. Суть её заключается в определении величины рассогласования входного сигнала с модельным – тестовым. Величина рассогласования определяется на основе функции невязки, в качестве которой традиционно служит функция взаимной корреляции. Основной операцией в корреляционной свёртке является операция умножения сигнальных отсчётов. Основными операционными элементами у объектов животного мира, как отмечено выше, являются нейроны, осуществляющие нелинейную пороговую операцию сигналов, поступающих на входы дендритов с синаптических контактов и формирующих выходные сигналы на выходах аксонов. Упрощённой математической моделью нейрона является модель нейрона Маккалока – Питтса [1, 2]. Некоторая модификация этой модели использовалась для формирования функции нелинейной невязки, альтернативной линейной ковариационной, а именно коммутативная модель нейроподобной функции свёртки (см. [3, 4]):

$$Q(y(t), x(t)) = 1 - N_c \times \frac{\int_{t_0}^{t_n} \max [|x(t)| \times L(t), |y(t)| \times M(t)] dt}{\int_{t_0}^{t_n} |x(t)| dt + \int_{t_0}^{t_n} |y(t)| dt}, \quad (1)$$

$$L(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } -|y(t)| \leq [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \\ 1, & \text{if } -|y(t)| > [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \end{cases}$$

$$M(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } -|x(t)| \leq [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \\ 1, & \text{if } -|x(t)| > [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \end{cases}$$

где  $x(t)$  – тестовый сигнал,  $y(t)$  – входной сигнал (смесь сигнала и шума на входе),  $N_c$  – эмпирический нормировочный коэффициент.

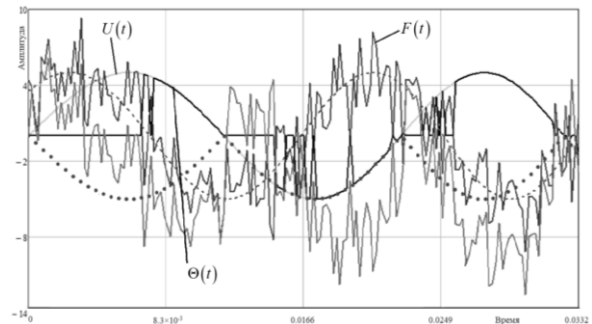
Здесь в отличие от модели нейрона Маккалока – Питтса порог нейроподобного элемента меняется в зависимости от амплитуд сигналов. По сути, основное отличие описанной выше функции нейроподобной невязки от функции корреляции заключается в замене линейной операции умножения сигнальных отсчётов процедурой модуляции сигналов, при которой отсчёты выходных сигналов на участках совпадения амплитудных характеристик «обнуляются» (1), либо, наоборот, «обнуляются» несовпадающие участки сигналов:

$$Q(y(t), x(t)) = N_c \times \frac{\int_{t_0}^{t_n} \max [|x(t)| \times L(t), |y(t)| \times M(t)] dt}{\int_{t_0}^{t_n} |y(t)| dt}, \quad (2)$$

$$L(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } -|y(t)| \leq [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \\ 0, & \text{if } -|y(t)| > [x(t) - y(t)] \cdot \frac{x(t)}{|x(t)|} \end{cases}$$

$$M(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } -|x(t)| \leq [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \\ 0, & \text{if } -|x(t)| > [y(t) - x(t)] \cdot \frac{y(t)}{|y(t)|} \end{cases}$$

Таким образом формируется функция нейроподобной невязки. Рисунок 1 иллюстрирует этот процесс.



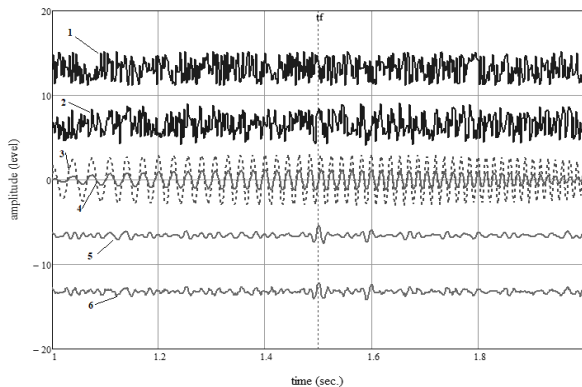
**Рис. 1.** Иллюстрация работы нейросвёртки:  $U$  – тестовый сигнал,  $F$  – входной сигнал,  $\Theta(U, F)$  – сигнал выхода нейроподобной функции

Сопоставительный анализ функции нейроподобной невязки в сравнении с ковариационной производился на основе численного стохастического моделирования с использованием математических пакетов MATHCAD и MATLAB.

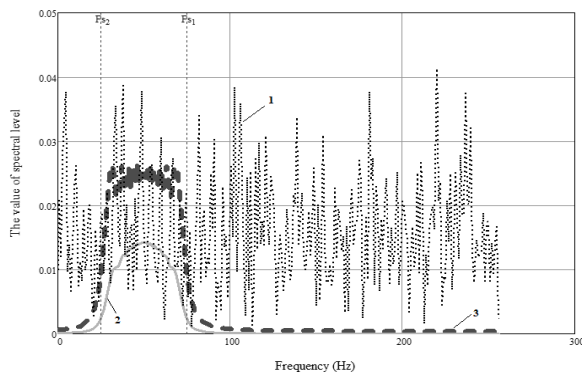
В качестве критерия оценки согласованной фильтрации, как принято в системах локации, используется критерий Неймана – Пирсона, при котором для заданного значения вероятности ошибки первого рода (ошибки ложного срабатывания, FAR) определяется допустимое значение вероят-

ности ошибки второго рода (ошибки пропуска цели, FRR).

В качестве лоцируемого и тестового сигналов в модели используются ЛЧМ-сигналы (рис. 2, 3). Входной и тестовый сигналы подвергаются процедуре согласованной фильтрации, формируя отсчёты ковариационной невязки, и обработке нейроподобной функцией невязки. Для оценки величины шумовой составляющей на входе вычисляется отношение SNR (сигнал/вход), при этом, естественно, учитывается только величина шума, распределённого в полосе сигнала. Для оценки результатов формируются рабочие характеристики ковариационной и нейроподобной функций невязок – зависимости достоверности (1-FRR) при заданном значении FAR от отношения SNR на входе.



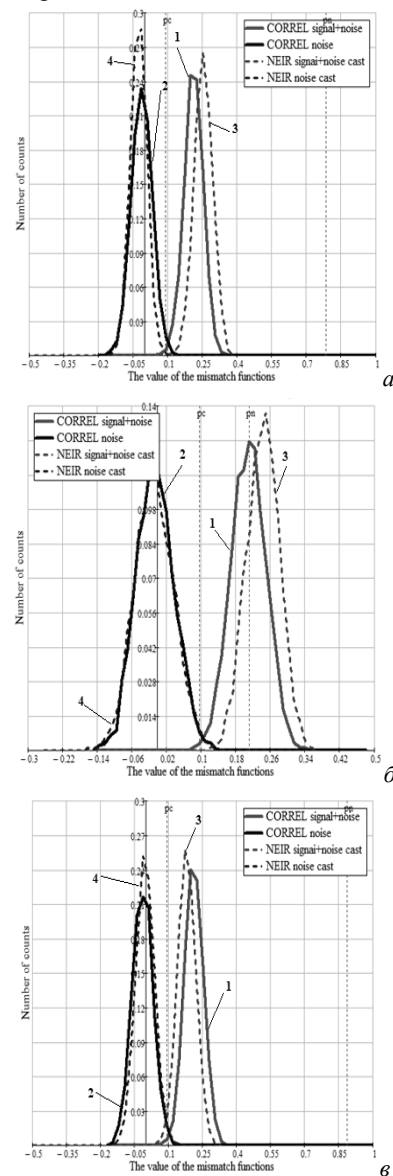
**Рис. 2.** Графики сигналов: 1 – сигнал входного белого шума, 2 – смесь сигнала с шумом на входе процедуры свертки, 3 – тестовый сигнал, 4 – сигнальная компонента входа, 5 – графики выхода ковариационной свертки, 6 – график выхода нейроподобной функции невязки



**Рис. 3.** Спектры входного шума 1, сигнальной компоненты входа 2 и тестового сигнала 3

Приведенные на рис. 4, а графики характерны для нестационарного шума и получены при условии, когда энергия шума, при которой происходит определение уровня порога для заданного значения FAR, больше энергии шума в момент определения уровня порога, определяющего текущее значение ошибки FRR, при этом используется функция невязки, определяемая формулой (1). Из графиков видно, что нейроподобная функция невязки, определяемая формулой (1), даёт результаты лучше ковариационной невязки: при одинаковом значении FAR достоверность нейроподобной невязки равна единице, а ковариацион-

ной – 0,995. Распределения на рис. 4, б получены для нестационарного шума, когда энергия шума, при которой определяется уровень порога для заданного значения FAR, меньше энергии шума в момент нахождения уровня порога, определяющего текущее значение ошибки FRR; при этом используется функция невязки по формуле (2). При этом нейроподобная функция невязки (см. формулу (2)) также даёт результаты лучше ковариационной невязки: при одинаковом значении FAR достоверность нейроподобной невязки равна единице, а ковариационной – 0,993. Однако при стационарном шуме (рис. 4, в), когда энергия шума постоянна, выигрывает ковариационная невязка, достоверность которой равна 0,993 при достоверности нейроподобной 0,969. Отметим, что эти результаты получены при стохастическом моделировании процесса согласованной фильтрации. В этой связи важным становится вопрос об анализе шумов в реальной природе, в частности о наличии в них тренда.



**Рис. 4.** Гистограммы (оценки плотности) распределения значений корреляционной (1 – смесь сигнала с шумом, 2 – шум) и нейроподобной (3 – смесь сигнала с шумом, 4 – шум) функций невязки



Один из подходов к решению этого вопроса был предложен Гарольдом Эдвином Херстом [5, 6] и в настоящее время находит широкое применение в различных приложениях (см., например, [7]) – метод нормированного размаха (RS-анализ). Он заключается в вычислении эмпирического показателя, известного как показатель Херста и определяемого соотношением

$$Hu = \frac{\log(R/S)}{\log(\tau/2)}, \quad (3)$$

где  $\tau$  – интервал времени,  $S$  – стандартное отклонение ряда на этом интервале,  $R$  – «размах» временного ряда на этом интервале.

Значения показателя Херста позволяют отличить: устойчивый тренд (персистентность) при  $Hu > 0,5$ , отсутствие тренда (белый шум) при  $Hu = 0,5$ , неустойчивый тренд (антиперсистентность) при  $Hu < 0,5$ .

Для большинства природных процессов этот показатель равномерно распределён вокруг значения 0,7 со стандартным отклонением, равным примерно 0,09.

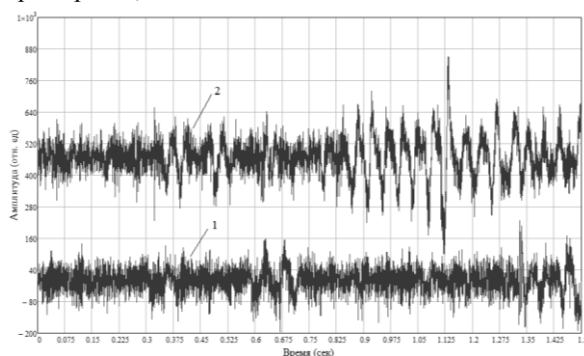


Рис. 5. Графики реальных акустических шумов, развертка по времени

На рис. 5 и 6 представлены примеры графиков реальных акустических шумов, полученных в натуральных условиях Черного моря. Показатели Херста для них равны 0,702 и 0,697 соответственно для 1 и 2 графиков. А их спектры распределены неравномерно по диапазону частот, что говорит о том, что шумы существенно отличаются от белого, пример спектра которого приведён на рис. 3 (линия 1). Объём реальных записей составил 16 файлов по 125 реализаций в каждом, и среднее по

ним значение показателя Херста составило 0,63, что говорит о наличии устойчивого тренда в реальных шумах моря.

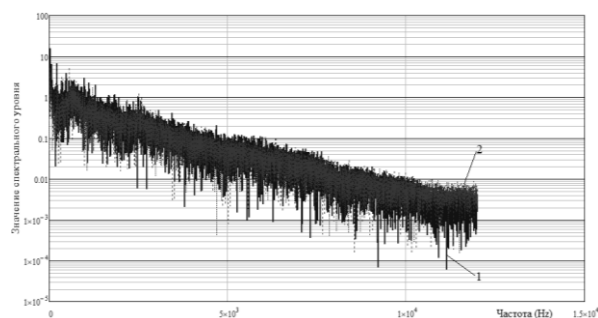


Рис. 6. Спектры реальных акустических шумов

Таким образом, наличие устойчивого тренда в реальных стохастических процессах позволяет сделать вывод о том, что реальные шумы имеют нестационарный характер. И в этом случае нейроноподобные нелинейные функции невязки имеют преимущество перед корреляционными.

Работа выполнена при поддержке РФФИ по гранту № 20-19-00383.

## Литература

1. McCulloch W.S., Pitts W. A logical Calculus of Ideas Immanent in Nervous Activity // Bull. Mathematical Biophysics, 1943.
2. Маккалох Дж., Питтс У. Логические исчисления идей, относящихся к нервной деятельности // Автоматы. М. : ИЛ, 1956.
3. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Яхно В.Г., Романова В.И. Обработка сложных сигналов нейроноподобными структурами // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях : труды всероссийской конференции. Н. Новгород : ИПФ РАН, 2011. С. 214–218.
4. Хоботов А.Г., Хилько А.И., Романова В.И. Использование нейросетевых структур свободной динамики с контекстно-зависимыми параметрами для наблюдения в неоднородных нестационарных средах // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, №2. С. 104–124.
5. Hurst H.E. Long-term storage capacity of reservoirs. // Transactions of American Society of Civil Engineers. 1951. V. 116. P. 770.
6. Hurst H.E., Black R.P., Simaika Y.M. Long-term storage: an experimental study. Constable, Лондон, 1965.
7. Кликушин Ю.Н. Метод фрактальной классификации сложных сигналов // Журнал радиоэлектроники. 2000. Т. 4.

# Математические загадки и когнитивный подход к проблемам преподавания дисциплин физико-математического цикла для инженерных специальностей вузов

В.Е. Хроматов<sup>1</sup>, Н.Г. Панкрашкина<sup>2</sup>, Т.Е. Семенова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НИУ «Московский энергетический институт», Москва

<sup>2</sup>Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород  
[KhromatovVY@mpei.ru](mailto:KhromatovVY@mpei.ru), [png2@rambler.ru](mailto:png2@rambler.ru)

Переход к двухуровневой системе образования бакалавр – магистр и выдача соответствующих дипломов не привел к исчезновению терминов инженерное образование, инженерная подготовка, инженерное мышление, что подразумевало, прежде всего, прикладное физико-математическое образование к техническим наукам.

В период развития и расцвета инженерной подготовки специалистов в нашей стране появилось даже выражение «инженеры человеческих душ». В настоящее время в научно-технической литературе употребляется термин «когнитивность» как способность к умственному восприятию и переработке внешней информации.

## Междисциплинарный подход при изучении технических дисциплин

В Институте прикладной физики РАН в этом году проводится 7-я Всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Два года назад мы изложили в сборнике трудов по данной тематике традиции когнитивного подхода научных школ Мандельштама – Андропова – Неймарка [1].

По нашим представлениям общеизвестный термин «когнитивность» не совсем правильно отражает надежды, возлагаемые на это определение. Проще было бы говорить о междисциплинарном подходе при изучении и изложении технических, физико-математических и естественно-научных дисциплин в вузе.

Появившееся в период оттепели 60-х годов прошлого века понятие «физики-лирики» уже обозначило постановку проблемы [2], которая получила развитие в наше время. В своих работах мы используем словосочетание «гуманитарная составляющая» при изложении технических дисциплин [3]. Некоторые аспекты применения законов механики к общественным взаимоотношениям приведены в работах [4, 5].

## Взгляд на преподавание математики

Математика – фундаментальная наука, которая изучается и в средней, и в высшей школе; по сути, ее роль умалить невозможно, хотя в настоящее время занижается место математики в общих программах средних и высших учебных заведений, навязывается система упрощения оценки знаний учащихся по математическому циклу.

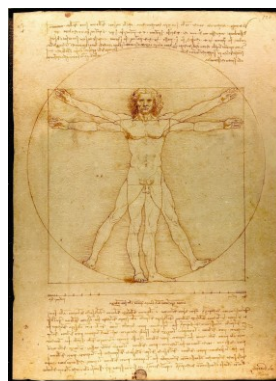
В качестве альтернативы последнему благоусмотрению достаточно привести слова великого русского ученого и просветителя Михаила Васильевича Ломоносова: «Математику уже потому надо изучать, что она ум в порядок приводит». Это высказывание является девизом механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова. Утешительно, что до сих пор переиздаются серии научно-популярных книг Якова Исидоровича Перельмана «Занимательная физика», «Занимательная математика», которые неоднократно издавались в течение прошлого столетия. Среди книг, популяризирующих математику, отметим издание [6], в которой сотрудник одного из ведущих европейских НИИ в области математики и теоретической информатики Микаэль Лоне (Michaël Launay, 1984 г.р.) доступно и популярно излагает краткую историю математики, некоторые математические парадоксы и проблемы, стоящие перед современной математикой.

## История числа Фибоначчи

В данной статье мы коснемся одной из задач математики, а точнее, проблемы золотого сечения, или числа Фибоначчи.

Таинственное число Фибоначчи, равное 1,618, интересует умы ученых уже на протяжении нескольких тысячелетий. Кто-то считает это число строителем мироздания, кто-то называет его числом Бога, а кто-то просто применяет его на практике и получает невероятные архитектурные, художественные и математические творения. Классический пример золотого сечения в архитектуре – Парфенон: по коротким сторонам 8 колонн, по длинным сторонам 17 колонн.

Число Фибоначчи было обнаружено даже в пропорциях известного изображения «Витрувианского человека» (лат. Homo Vitruvianus), оставленного в 1492 г. в одном из дневников гениального художника и ученого Леонардо Да Винчи (Leonardo di ser Piero da Vinci, 1452–1519), который утверждал, что знаменитое число, пришедшее из математики, руководит всей Вселенной.



Ответ на этот вопрос сокрыт в удивительных числах, открытых итальянским математиком Леонардо Пизанским, более известным под именем Фибоначчи (итал. Leonardo Pisano по прозвищу Fibonaci, годы жизни ок. 1170–1228).

Перед тем как стать одним из самых известных математиков раннего Средневековья, Леонардо Пизанский изучал точные науки у самых продвинутых учителей своего времени, а ими считались арабы. Именно благодаря этой деятельности Фибоначчи, в Европе появились арабские цифры и десятичная система счисления, которые мы по сей день успешно используем.

### **Особенность последовательности чисел Фибоначчи**

Последовательность чисел Фибоначчи состоит в том, что каждое число в ней получается из суммы двух предыдущих чисел. Числа, образующие последовательность: 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, ... называются «числами Фибоначчи», а сама последовательность – последовательностью Фибоначчи. В числах Фибоначчи существует определенная особенность.

При делении любого числа из последовательности на число, стоящее перед ним в ряду, результатом всегда будет величина, колеблющаяся около иррационального значения 1.61803398875..., и через раз то превосходящая, то не достигающая его. Более того, после 13-го числа в последовательности этот результат деления становится постоянным до бесконечности ряда.

Именно это постоянное число деления в средние века было названо *Божественной пропорцией*, а ныне именуется *золотым сечением* или *золотой пропорцией*. В алгебре это число обозначается греческой буквой «фи» ( $\Phi$ ).

Золотая пропорция = 1 : 1,618

233 / 144 = 1,618

377 / 233 = 1,618

610 / 377 = 1,618

987 / 610 = 1,618

1597 / 987 = 1,618

Классическое определение *золотой пропорции*: меньшее относится к большему так, как большее относится к целому с коэффициентом 1,618.

### **Тело человека и золотое сечение**

Пропорции различных частей тела человека составляют число, очень близкое к золотому сечению. Если эти пропорции совпадают с формулой золотого сечения, то внешность или тело человека считаются идеально сложенными. Принцип расчета золотой меры на теле человека можно изобразить в виде схемы:  $M/m = 1,618$ .

Приведем первый пример золотого сечения в строении тела человека. Если принять центром человеческого тела точку пупа, а расстояние между ступней человека и точкой пупа за единицу измерения, то рост человека эквивалентен числу

1.618. Есть еще несколько основных золотых пропорций нашего тела:

– расстояния от кончиков пальцев до запястья и от запястья до локтя соотносятся как 1 : 1.618;

– размер головы соотносится к расстоянию от уровня плеча до макушки головы как 1 : 1.618;

– расстояние от уровня плеча до макушки головы соотносится к расстоянию от точки пупа до макушки головы как 1 : 1.618;

– расстояние от коленей до ступней соотносится с расстоянием от точки пупа до коленей как 1:1.618;

– расстояние от кончика верхней губы до ноздрей соотносится с расстоянием от кончика подбородка до кончика верхней губы как 1 : 1.618;

– расстояние от верхней линии бровей до макушки соотносится с расстоянием от кончика подбородка до верхней линии бровей как 1 : 1.618 и т. д.

### *Рука человека и золотое сечение*

Достаточно лишь приблизить ладонь к себе и внимательно посмотреть на указательный палец, сразу же найдем в нем формулу золотого сечения. Соотношение между средним пальцем и мизинцем также равно числу золотого сечения.

### *Черты лица человека и золотое сечение*

Золотое сечение в чертах лица – критерий совершенной красоты. В строении черт лица человека есть множество примеров, приближающихся по значению к формуле золотого сечения. На человеческом лице существуют правила золотого сечения 1 : 1,618. Приведем несколько примеров: ширина лица / высота лица; ширина носа / высота носа; расстояние между зрачками / расстояние между бровями и т. д.

### **Строение золотого четырехугольника и спирали**

Золотое сечение – это такое пропорциональное деление отрезка на неравные части, при котором весь отрезок так относится к большей части, как сама большая часть относится к меньшей; или, другими словами, меньший отрезок так относится к большему, как больший ко всему.

В геометрии прямоугольник с таким отношением сторон называют золотым прямоугольником. Его длинные стороны соотносятся с короткими сторонами в соотношении 1,618 : 1.

Золотой прямоугольник также обладает многими удивительными свойствами. Отрезав от золотого прямоугольника квадрат, сторона которого равна меньшей стороне прямоугольника, снова получим золотой прямоугольник меньших размеров. Этот процесс можно продолжать до бесконечности. Продолжая отрезать квадраты, будем получать все меньшие и меньшие золотые прямоугольники. Причем располагаться они будут по логарифмической спирали, имеющей важное значение в математических моделях природных объектов (например, раковинах улиток).

Полюс спирали лежит на пересечении диагоналей начального прямоугольника и первого отрезанного вертикального. Причем диагонали всех последующих уменьшающихся золотых прямоугольников лежат на этих диагоналях.

Правило золотого сечения, лежащее в основе строения спирали, встречается в природе очень часто в необычных по красоте творениях. Перечислим самые наглядные примеры – спиралевидную форму можно увидеть в расположении семян подсолнечника, в шишках сосны, в ананасах, кактусах, строении лепестков роз и т. д.

Все пружинки спирали имеют одинаковую форму. Математики установили, что даже при увеличении размеров пружинки форма спирали остается неизменной.

В математике нет более универсальной формы, которая обладала бы такими же уникальными свойствами, как спираль. Во Вселенной все известные человечеству галактики и все тела в них существуют в форме спирали, соответствующей формуле золотого сечения.

### Главные правила эстетики

Строение всех встречающихся в природе живых организмов и неживых объектов спланировано по определенной математической формуле. Формула золотого сечения и золотые пропорции – это главные правила эстетики. Любое произведение искусства, спроектированное в точном соответствии с пропорциями золотого сечения, являет собой совершенную эстетическую форму. Если попытаться проанализировать особенности совершенства произведения, можно обнаружить пропорции, подчиняющиеся числу Фибоначчи.

### Законы развития общества

Законы развития общества также принято считать происходящими по законам изменения спирали, поэтому, мы думаем, можно надеяться на гармоничное развитие природы и общества.

### Заключение

Когнитивные подходы к изложению общеобразовательных и научных дисциплин позволяют

привлечь к науке также и учащуюся молодежь, обратить внимание на это профессиональных преподавателей. Нельзя снижать уровень преподавания фундаментальных дисциплин – математики, теоретической физики и прикладной механики. Но нельзя сокращать и гуманитарную составляющую образования, что, безусловно, приведет к потере общей культуры специалиста с высшим образованием.

### Литература

1. Сляднев С.Е., Панкрашкина Н.Г., Хроматов В.Е. Традиции когнитивного подхода научных школ Мандельштама – Андропова – Неймарка // Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2019 : труды VI Всероссийской конференции / Федер. исслед. центр Институт прикладной физики РАН [и др.]; отв. ред. В.А. Антонец, С.Б. Парин, В.Г. Яхно. Нижний Новгород : ИПФ РАН, 2019. С. 170–172.

2. Хроматов В.Е., Панкрашкина Н.Г. Физики об истории науки и техники в лирическом изложении // Эпохи. Люди. Идеи. История, культура и творчество в персоналиях : сборник докладов Международной научной конференции – XLII Добролюбовские чтения / под ред. Г.А. Дмитриевской, В.М. Строгеевой. Нижний Новгород: Издат. салон ИП Гладкова О.В., 2019. С. 211–219.

3. Хроматов В.Е., Бесова А.В., Новикова О.В. Соотношения образовательной, гуманитарной и воспитательной компонент при изучении дисциплин прикладной механики в НИУ «МЭИ» // Международная научная конференция «Фундаментальные и прикладные задачи механики» : тезисы докладов. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. С. 46–47.

4. Хроматов В.Е. Применение законов механики к межличностным взаимоотношениям в обществе // Сборник материалов двенадцатой научно-практической конференции «Сахаровские чтения» / под. ред. М.Г. Деминой. Нижний Новгород, 2019. С. 30–35.

5. Хроматов В.Е., Панкрашкина Н.Г., Новикова О.В. Когнитивный подход к изложению дисциплин механики твердого тела для инженерных специальностей вузов // Материалы XXVI международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. М. : ООО «ТРП», 2020. Т. 1. С. 227–231.

6. Лонз Михаэль. Большой роман о математике: история мира через призму математики / пер. с франц. М. : Эксмо, 2020. 416 с.

# К творческому познанию: креативные начала реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением

В.Д. Цукерман

Академия биологии и биотехнологии им. Д.И. Ивановского ЮФУ, Ростов-на-Дону;  
email: vtsukerman17@yandex.ru

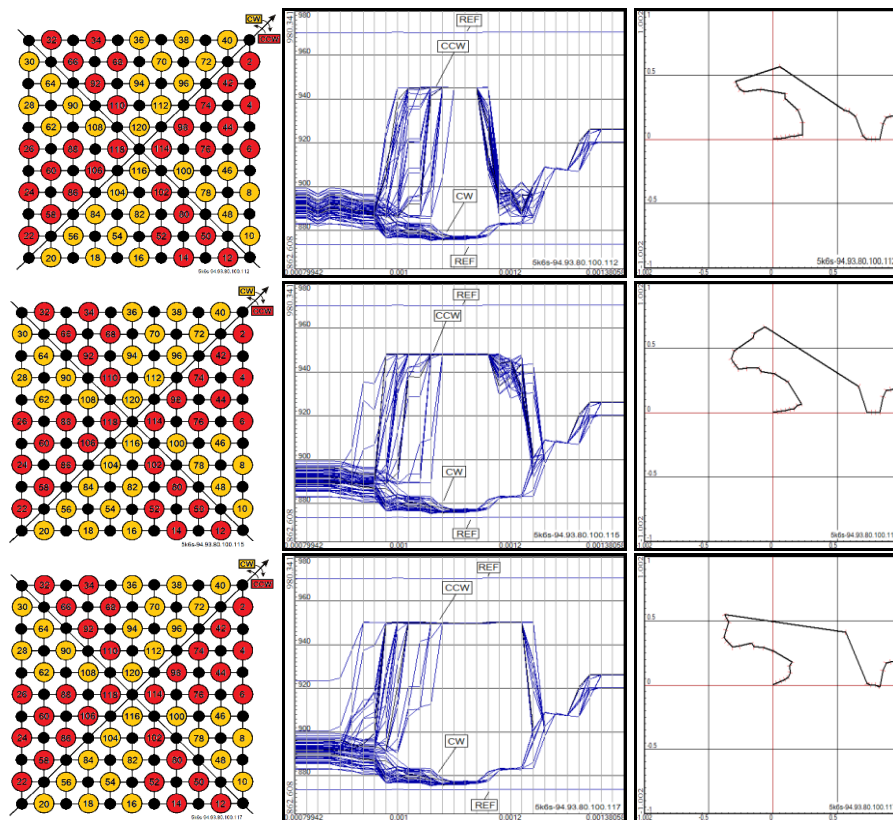
Нейронаука творческой деятельности – новое направление наук о мозге. Основу этого направления составляют достижения психологических исследований последних десятилетий и новейшие результаты нейробиологических исследований. Предполагается, что ментальные механизмы на нейросетевом уровне, поддерживающие творческое мышление и творческое познание, возникают из взаимодействия когнитивных процессов более низкого уровня [1]. Креативное познание и креативное мышление – это сложные процессы, включающие в себя компоненты внимания, когнитивного контроля, воображения, обобщения и памяти [2]. Вместе с тем, базисом этих творческих процессов служит реляционное мышление, т. е. способность мозга устанавливать связи между, казалось бы, несвязанными концептами. Различные аспекты творческого мышления поддерживаются эпизодической и семантической памятью. Семантическая память обеспечивает базовые знания фактов и концептов, которые можно комбинировать для решения творческих задач и генерации новых идей [3], что подтверждается когнитивными и fMRI-исследованиями семантической памяти [4]. Важными понятиями в теориях о роли семантической памяти в творческом мышлении являются концептуальные пространства и семантическая дистанция. В последние годы растёт число доказательств наличия общих нейронных механизмов, лежащих в основе навигации как в физическом, так и семантическом пространстве, с использованием в обоих случаях кодов направления и расстояния между местами, даже если они являются категорическими и обозначенными символами [5].

Концептуальное знание частично организовано в низкомерные геометрии – «когнитивные карты», которые являются аналогами ориентированных на мир представлений окружения и ассоциируются с гиппокампальной формацией мозга и «пространствами изображений», которые являются аналогами эгоцентрических пространственных отношений и главным образом ассоциируются с теменной (париетальной) корой. Когнитивные карты и пространства изображений могут быть конкретными проявлениями более общей склонности человеческого мозга *организовывать знания в низкомерных пространствах* [6, 7]. Схемы изображений более абстрактны, чем обычные визуальные ментальные образы, и состоят из динамических пространственных паттернов, которые лежат в основе пространственных отношений и движений, обнаруживаемых в частных реальных изображениях. Низкомерные когнитивные карты и пространства изображений играют ключевую роль

в замечательной способности человека проводить аналогии в разных областях. В принципе проведение аналогий предполагает игнорирование многих различий и сосредоточение внимания на нескольких сходствах между объектами. Кроме того, низкомерные когнитивные карты могут быть важны для создания аналогий между объектами и событиями, которые могут быть далеки в нашем опыте, но которые можно сравнить всего по нескольким выбранным измерениям [7].

Генеративность – важнейшая для когнитивных функций мозга способность, в том числе для планирования будущего, воображения, принятия решений, творческой деятельности. Генеративность дает вклад в поведение предсказанием будущего результата, что явно направляет текущее поведение и творческий потенциал, и указывает на унифицированную роль в познании. Как реализуется генеративность в мозге на нейронном уровне, каковы кандидатные паттерны нейронной активности, кодирующие возможный будущий сценарий? Экспериментально установлено, что гиппокамп представляет альтернативные гипотетические сценарии *поочередно и циклически примерно каждые 125 мс*, что соответствует тета-ритму, т. е. мозг моделирует все возможные сценарии поведения, а не только реализуемые в будущем! При этом лежащие в основе паттерны активности имели эквивалентную временную структуру среди различных местоположений и направлений движения, подразумевая общий процесс циклического кодирования. Более того, цикл запускался на всех уровнях: от одиночных клеток до их популяций [8].

В процессе эволюции природа создала организмы, способные отвлекать свое внимание от настоящего момента для создания личного ментального пространства, в котором может быть реализовано бесконечное количество возможностей. Содержимое этого ментального пространства может принимать разные формы: от фантазий до повторных переживаний прошлого события или воображения того, как может разворачиваться будущее событие. Всё это является актом творческого мышления, ментальным представлением того, чего не существует в данный момент [9]. Отметим, что определение «*imagination*» – «воображение» данное Oxford English Dictionary, звучит как «...способность формировать внутренние образы или идеи объектов и ситуаций, которые на самом деле не воспринимаются органами чувств». Какие нейродинамические феномены лежат в основе этой способности мозга – один из основных вопросов настоящего исследования.



**Рис. 1.** Три примера из искусственного семантического пространства изображений животных (сверху вниз: DOG, BUL и CAT), полученные обучением сети входными потоками сигналов, синтезированных автором вручную. Обучающий набор каждого концепта состоит из 6 событий (4 CCW- и 2 CW-сигналов), разделенных временными интервалами различной длительности. В каждом ряду, слева направо: схема ECI-сети, обученная паттернами входных сигналов того или иного концепта; в центре – кривые фазовых ответов всех нейронов сети в референтном тета-цикле (показан двумя горизонтальными линиями, обозначенными REF на графике вдоль вертикальной оси; многочисленные вертикальные линии – временной шаг пространственного контекста обучения равный  $2 \cdot 10^{-5}$ ; справа – вызов из памяти сети, т. е. декодирование популяционного векторно-фазового кода концептов DOG, BUL и CAT. Подробнее см. в работе [10] и ранних работах автора

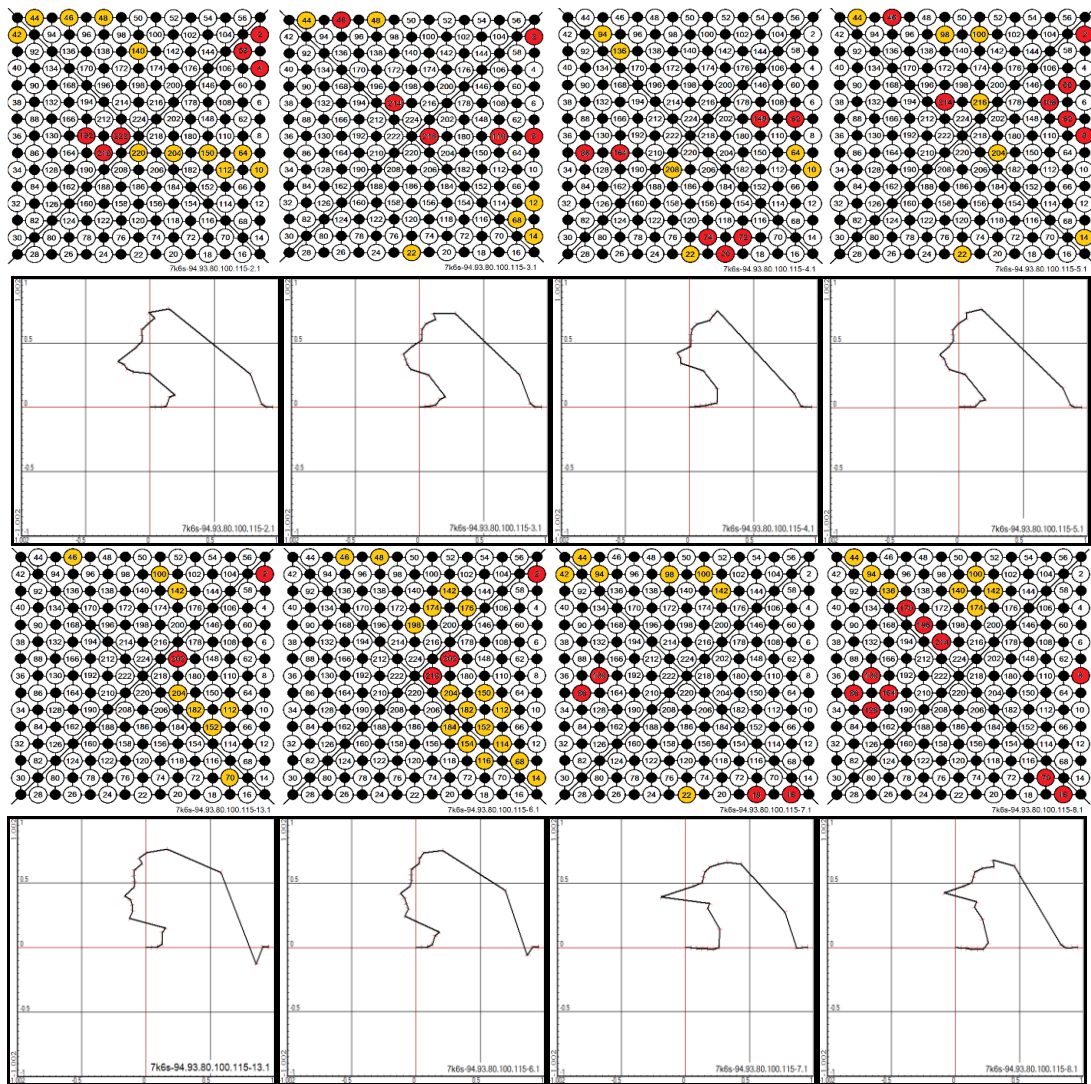
В вычислительных экспериментах получен широкий набор изоморфных представлений концептов в результате: а) масштабных преобразований пространств изображений в широком диапазоне временных шкал входного потока сигналов концептов DOG, BUL и CAT; б) расширения ряда абстрактных концептуальных представлений животных посредством временных аналоговых преобразований входного потока сигналов; в) рекрутирования распределенных групп нейронов при вызове из памяти (декодировании) концептов; г) регуляции позы животных посредством избирательного участия нейронов в процессе; д) экспериментального подтверждения зависимости психологической близости концептов от семантической дистанции – известный факт в когнитивной психологии. Так, на рис. 1 семантическая дистанция между концептами DOG и BUL составляет 3 безр. ед., а между концептами BUL и CAT – 2 безр. ед., что соответствует меньшему сходству первой пары и большей психологической близости последних представлений. Действительно, узкая и удлиненная форма морды DOG больше отличается от укороченных и более широких форм BUL и CAT.

Далее, экспериментами на модели показан ряд результатов, определяющих когнитивную нейродинамику сети. Нейродинамическое сходство и различия кривых фазовых ответов каждого объекта данного класса хорошо видны на рис. 1. Интересно, что полученные различия данных кривых определяются лишь последним временным интервалом в обучающем наборе данных, вызывающем заметную перестройку всей цепочки последовательных сегментов пространственной траектории. Эта координированная векторно-фазовая перестройка и вызывает смену наблюдаемых концептов.

Другой важный пример динамической векторно-фазовой перестройки, результатом которой стал многочисленный набор изоморфных концептов каждого объекта, был получен при считывании кода из малых распределенных групп нейронов с исходной селективной CW- и CCW-настройкой. Описанные выше результаты представлены в презентации доклада.

Следующая серия экспериментов демонстрирует креативные возможности ECI-сети, генерацией концептов абстрактными представлениями, которым сеть не была обучена (рис. 2).





**Рис. 2.** Обученная сенсорным набором данных концепта BUL (см. рис. 1), ECI-сеть «ментально» представляет различными распределенными группами меченных нейронов на схеме сети в 1-м и 3-м ряду рисунка многочисленные концепты животных, птиц и даже человека (2-й и 4-й ряд). Генерация воображаемых образов сетью, обученной единственному концепту BUL, свидетельствует о её способности к обобщениям на целый класс живых организмов, тем самым значительно расширяя собственное семантическое концептуальное пространство

В отличие от ранее представленных серий экспериментов, где строго соблюдалась дирекциональная избирательность кластеров клеток, отмеченных разными цветами на схеме сети как при обучении, так и при вызове из памяти, в данной серии экспериментов была реализована *смешанная селективность нейронов*, иначе говоря места в «одноцветных» кластерах при вызове из памяти могли замещаться клетками с противоположной дирекциональностью (см. рис. 2). Таким образом феномен креативного познания обусловлен тем, что «ментальное» воображение реализуется вследствие *рекомбинации элементов события или концептуальных признаков*. На рис. 2 приведены результаты, свидетельствующие о широком разнообразии полученных абстрактных концептуальных представлений в семантическом пространстве организмов. Подводя итог, можно заключить, что расширение семантического пространства за счет смешанной селективности нейронов повышает уровень категоризации и, следовательно, приводит к обобщению ментальных

представлений на более широкий класс объектов, несмотря на обучение единственному концепту BUL, как в данном примере.

Наконец, следующий важный атрибут, определяющий нейродинамику вообще и, в частности, креативные возможности ECI-сетей – их структурная организация, включающая в себя референтную систему некодирующих нейронов, показанных на схеме сети малыми кружками черного цвета (рис. 1, 2). Функциональное назначение этих нейронов многозначно: а) эти нейроны обеспечивают устойчивость режимов генерации сетей с положительными обратными связями, сформированными вследствие известного нейрофизиологического феномена «*торможение торможения*» в схеме сети; б) эти нейроны генерируют *когерентную тета-ритмическую активность*, представленную на графике началом и концом референтного тета-ритма двумя горизонтальными линиями (на рис. 1 обозначено REF); в) «запертый» этой системой нейронов диапазон фаз ограничивает многочисленные значения кривых фазовых



ответов всех кодирующих нейронов, независимо от размерности ЕСИ-сети; г) эти нейроны участвуют в координации доступа к хранилищу семантических знаний в распределенных группах нейронов сети. Пояснить последний функционал референтной субсети можно следующим примером. Функция дирижёра оркестра заключается во временной координации вступления и изменения ритмов отдельных инструментов или их групп, т. е. по существу амплитудно-фазовой модуляции текущего музыкального произведения. Аналогичную функцию выполняет экспериментатор-исследователь при вызове из памяти сети определенной группы маркированных нейронов, соответствующих воображаемому концепту, который в реальности может использоваться для сравнения нейросетевой модели с внешним перцептуальным объектом.

Важно подчеркнуть координирующую роль данной субсети нейронов в вызове памяти, отметив при этом, что подобная система в мозге была впервые описана Marcus Raichle в 2015 году [11], получив названия *Default Mode Network (DMN)* – нейронная сеть оперативного покоя, сеть пассивного режима работы мозга, сеть режима мозга по умолчанию (в переводе с англ.). DMN состоит из дискретных, билатеральных и симметричных областей в париетальной, префронтальной, энторинальной коре и гиппокампе [4, 11–14]. Процессы вызова эпизодической и семантической памяти привлекают обширные и в значительной степени перекрывающиеся сетевые регионы режима по умолчанию и различаются, главным образом, разными вкладами регионов гиппокампальных и парагиппокампальных регионов в вызов эпизодической памяти [12].

Современные представления о том, как формируются в мозге новые знания, воображение и творческое мышление основаны на двух фундаментальных процессах структурирования знаний в виде когнитивных карт и когнитивных графов. Когнитивные карты и когнитивные графы могут сосуществовать у одних и тех же людей, причем их доступность и использование зависят от характеристик окружающей среды и целевых потребностей организма. Когнитивные карты и когнитивные графы создаются частично различными, но частично перекрывающимися нейронными системами в гиппокампальной формации, фронтальных (лобных) долях и избирательных к сценам кортикальных областях. Обе системы представлений, вероятно, могут поддерживать абстрактное мышление [6, 15]; когнитивные карты релевантны концептуальным представлениям, *изменяющимся вдоль непрерывных измерений*, тогда как когнитивные графы – представлениям переходов между состояниями и дискретными ассоциациями между элементами [16]. Что даёт нам знание абстрактных «когнитивных» переменных или концептов, примеры которых были приведены в результате модельных исследований? Знание абстрактных

переменных позволяет *обобщить и сразу сделать выводы о вновь встреченных жизненных обстоятельствах*. Гиппокамп и энторинальная кора мозга образуют реляционные когнитивные карты, которые способствуют не только эпизодической памяти, но также поддерживают формирование концептов, представляя релевантные признаки для различения связанных понятий. Навигация внутри гиппокампальных когнитивных карт, которые руководствуются решетчатым гексагональным кодированием в энторинальной коре и реализованное моделированием в ЕСИ-сетях, способствует воображению концептов, представленных в настоящем исследовании.

## Литература

1. *Abraham, A.* The promises and perils of the neuroscience of creativity // *Front. Human Neurosci.* 2013. V. 7. Art. 246.
2. *Benedek, M., Fink, A.* Toward a neurocognitive framework of creative cognition: the role of memory, attention, and cognitive control // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019. V. 27. P. 116–122.
3. *Kenett, Y.N., Faust, M.* A semantic network cartography of the creative mind // *Tren. Cogn. Sci.* 2019. V. 23. P. 271–274.
4. *Beatty, R.E. et al.* Default network contributions to episodic and semantic processing during divergent creative thinking: A representational similarity analysis // *NeuroImage.* 2020. V. 209. 116499.
5. *Vigano, S., Piazza, M.* Distance and direction codes underlie navigation of a novel semantic space in the human brain // *J. Neurosci.* 2020. V. 40. P. 2727–2736.
6. *Behrens, T.E.J. et al.* What is a cognitive map? Organizing knowledge for flexible behavior // *Neuron*, 2018. V. 100. P. 490–509.
7. *Bottini, R., Doeller, C.F.* Knowledge across reference frames: cognitive maps and image spaces // *Tren. Cogn. Sci.*, 2020. V. 24. P. 606–619.
8. *Kay, K. et al.* Constant sub-second cycling between representations of possible futures in the hippocampus // *Cell*, 2020. V. 180. P. 552–567.
9. *Raffaelli, Q. et al.* The neuroscience of imaginative thought: an integrative framework // *The Cambridge Handbook of the Imagination / A. Abraham (Ed.)*. Cambridge University Press, 2020.
10. *Цукерман, В.Д.* Что скрывает нейродинамика мозга (Современные данные и модель) // «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях-2019»: Матер. Всерос. конф. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2019. С. 222–225.
11. *Raichle, M.E.* The brain's default mode network // *Ann. Rev. Neurosci.*, 2015. V. 38. P. 433–447.
12. *Kim, H.* Default network activation during episodic and semantic memory retrieval: A selective meta-analytic comparison // *Neuropsychologia*, 2016. V. 89. P. 35–46.
13. *Marron, T.R. et al.* Chain free association, creativity, and the default mode network // *Neuropsychologia*, 2018. V. 118. P. 40–58.
14. *Higgins, C. et al.* Replay bursts coincide with activation of the default mode and parietal alpha network // *Neuron*, 2021. V. 109. P. 882–893.
15. *Bellmund, J.L.S. et al.* Navigating cognition: Spatial codes for human thinking // *Science*, 2018. V. 362. P. 1–11.
16. *Peer, M. et al.* Structuring knowledge with cognitive maps and cognitive graphs // *Trends Cogn. Sci.* 2021. V. 25. P. 37–54.

# Художественный критерий в архитектурном формообразовании и постулярный баланс

О.Н. Чеберева

ВГОУ ВО «Нижегородский архитектурно-строительный университет»; email: chebereva@mail.ru

Художественный приоритет в формообразовании [1], как правило, проявляется в безусловной эстетической выразительности, активном пластическом языке формы, и ведет, как правило, к созданию новых стилистических течений. Отсутствие регламента алгоритма проектной деятельности и трудности производства индивидуальных элементов – это не только трудности, но и поле для творчества. В случае Гауди художественный метод является основой уникальной выразительности, эргономичности и конструктивной долговечности объектов, аутентичной содержательности формы. Художественный приоритет отличает творчество архитектора-конструктивиста В. Татлина и архитектора-деконструктивиста З. Хадид. Но в чем его практическая значимость?

Красота, эстетичность – психофизиологически направленная функция архитектуры. Это экспериментально и научно доказано на примере таких формально-композиционных признаков, как цвет и пропорции [2, 3]. В арсенале современной науки есть много способов оценки степени психологического комфорта человека в городской среде: анкетирование, слежение за направлением и скоростью движения пешехода, взглядом, сердцебиением, состоянием нервной системы, активностью отделов мозга для определения влияния окружающей среды на самочувствие, настроение, здоровье, работоспособность. Архитектура со времен Египта и античности использовалась для опосредованного влияния на сознание людей. Формы пирамид, монументальность ордерных систем Рима, классицизма, ампира, сталинской архитектуры и третьего рейха оказывают на людей воздействие до сих пор.

Специалисты, входящие в ANFA (Академии нейронаук для архитектуры), – архитекторы и психофизиологи; связь стимула – структуры формы – аффекторных ответов: реакций действия, движения и состояния. Ученые ANFA доказали ценность эстетической составляющей архитектурно-пространственных форм инструментально: созерцание архитектурных шедевров уменьшает внутренний диалог и улучшает внимание, функции префронтальной коры, затылочной доли, прецентральной извилины, миндалевидного тела и вызывает изменения деятельности мозга, сходные с медитацией, т. е. красота – опосредованная функция архитектурной формы. Анализ реакций на 2982 визуальных стимула в виде фото зданий показал, что, кроме церквей, мечетей и других религиозных зданий, ряд зданий художественных галерей и музеев – музей Гуггенхайма в Бильбао, Лувр, дом над водопадом Ф. Л. Райта – входят в

десятку наиболее завораживающих «созерцательных» объектов. В условиях монотонной, безликой, формально организованной из однотипных элементов среды, в которой преобладают ровные прямоугольные поверхности, искусственные материалы, равномерное освещение, уровень серотонина падает, гипоталамо-гипофизарная система получает неосознаваемые сигналы агрессии, приводящие к стрессу, изменениям в миндалевидном теле мозга, соответствующем длительным тревожным состояниям, дистрессу и снижению общего энергетического потенциала мозга, лежащему в основе неврозов, депрессий и сбоев психики.

Генетическая память настроена на поддержку должного уровня нейрогормонов в гипоталамо-гипофизарной системе за счет солнечного света, вида живого огня, игры света и тени, а не однородного офисного света, включающего механизмы подсознательной тревоги. Чередование зон разной освещенности, тональной и хроматической насыщенности, разнообразия форм и пропорций при некотором когнитивно-типологическом единстве воспринимается подсознанием спокойнее, чем пространство, одинаково залитое светом. Балансируется работа нейрогормонов, отвечающих за чувство спокойствия, радости, удовлетворенности, полноты жизни.

Возрастающая плотность населения, интенсивность информационных потоков и изменчивость жизни в мегаполисах порождают кризисы эмоционального восприятия и самосознания, вызывающие усиление потребности возвращения в состояние покоя, ассоциирующегося с природной, естественной пространственной средой, с другой стороны, тенденции к интенсификации техногенной пространственной и эргономической среды, нарушают границы личного пространства и даже биологического тела человека.

Психическая жизнь современного человека продолжает усложняться и наполняться новыми абстрактными образами, в приоритете среди которых – образ возможного будущего, сегодня связанный с постмодернистскими категориями граничности, подвижности, текучести, нестабильности и др. Влияние среды на психику сегодня превратилось в отдельную дисциплину. Началась она с течения экологичной, в том числе визуально неагрессивной, архитектуры – сочетания науки, философии, биологии и архитектуры, куда сегодня внесены помимо внешних, растительно-геологических форм образы космического пространства, микромира. Это берет свое начало на рубеже XIX–XX вв. в антропософии. Пионером в реализации поселения такого типа стал город «альтер-

нативной» архитектуры – Ауровиль в Индии, названный в честь мыслителя Шри Ауробиндо.

Сложные криволинейные поверхности использовали «адриановским» протобарокко во II в. до н. э., барокко XVII—XVIII вв. и рококо XVIII вв., но в основе стилей лежали те же ордерно-тектонические принципы построения формы в целом, что и в августовском «классицизме», в архитектуре эпохи Возрождения, зрелом классицизме и ампире. Поэтому сложные поверхности, чаще всего, использовали малого масштаба и в качестве геометрических элементов декора, скульптурной пластики архитектурных деталей, кровель, шпилей, при этом детали моделировались 1:1 в дереве с переносом в камень, лепные или металлические формы.

В XXI в. новые технологии позволили сложной пластике объемных форм уверенно шагнуть в архитектуру. Поверхности высоких порядков используют в архитектуре З. Хадид и Ф. Гери. Бюро З. Хадид Аркитектс применяет программы параметрического моделирования, а Гери – трехмерное сканирование рукотворных моделей-макетов. Л. Кан, П. Нойферт, К. Танге, Т. Ито, З. Хадид и многие другие использовали в объектах возможности формообразования объектов «второй природы» (так называют архитектурную среду) на основе правильных и полуправильных многогранников, схожие со структурой кристаллов и квазикристаллов, математических концептов (Вороного и Делоне), точки-аттракторы для деформации форм, образ вокселя, фракталоподобные структуры, результаты исследований и математических описаний сложных природных и социальных систем [4], заложенные такими учеными, как И. Пригожин, Б. Мальдельброт, Жюлиа, Р. Том, А. Пуанкаре, А.А. Андронов, А.Н. Колмогоров [1], а также теории хаоса и сложности [1].

В механизмах восприятия головным мозгом трехмерного пространства, помимо декартовых в вестибулярном аппарате задействована третья, проходящая сквозь человека спереди назад – сагитталь [5], напрямую связанная с инстинктом цели. Различают три фазы сагиттального движения, начиная с младенческого возраста: устремленность к объекту, достижение его и обладание им, по слову М.А. Чехова: «Во-первых, вы держите незримо объект вашего внимания. Во-вторых, вы притягиваете его к себе. В-третьих, сами устремляетесь к нему. В-четвертых, вы проникаете в него» [6]. Понятие «зона ближайшего развития» [6], напрямую связанное с сагиттальным движением, отражено в учении Станиславского, напрямую связано со сценарностью архитектурной формы и категориями зрелищности архитектурной среды и раскрывает его как результат афферентного синтеза при выборе пути в трехмерном пространстве, напрямую обусловленный параметрами акцептора действия [7], опосредованный эфферентным синтезом. Идеальный пример сценариев сагиттали – улица, ведущая к архитектурной доминанте, неф христианской базилики, особенно, готической, в конце которого расположена композиционная и

семантическая доминанта – алтарь. Термины теории композиции и психофизиологии коррелируют не случайно. Цель теории композиции – режиссура восприятия [8]. Напрямую связанный с сагитталью формально-композиционный признак ориентации в пространстве определяет положение формы в физическом и перцептивном пространстве по отношению к осям координат, к географическим сторонам света, зрителю, другим формам. Ориентация связана с бессознательными моторными мускульными движениями, вызывающими смещение центра тяжести тела зрителя для сохранения равновесия, компенсации «кривизны» пространства.

Положение формы по отношению к осям координат определяется наибольшей по площади поверхностью формы или доминирующей осью. По расположению доминирующей оси форма или элемент может быть вертикальной, горизонтальной, наклонной, поворотной, сообщать композиции формы статические или динамические характеристики. На протяжении истории архитектуры меняется понимание красоты и выразительности архитектурной формы, оценка таких критериев ее построения, как упорядоченность, иерархичность, сбалансированность.

Результатом противоположных тенденций становится исчезновение стиля, конвергенция гуманитарных и техногенных течений в архитектуре, трансформация критерия выразительности формы из эстетической категории в интеллектуальную – зданий-инфоструктур и зданий-гололомок. Ассоциативный ключ к восприятию постмодернистских идей нестабильности, хаоса, напряжения, динамики – биомеханика зрителя. Структурная выразительность архитектурной формы взаимодействует с граничными состояниями постулярного баланса. Интеллектуальным критерием новой гармонии становится парадокс тектонической неустойчивости, фактический контраст конструкции формальной и фактической, создающий сагиттальную многомерность восприятия, дезориентирующий зрителя вплоть до вторжения в его внутриличностное мотивационное пространство, напрямую связанное с проекций физического пространства в перцепции.

По мысли Бернштейна [9]: «Пространственное поле уровня С (пluckорткального – по Бернштейну, прим. авт.) не есть ни ощущение, ни их сумма. Пока оно формируется, в нем участвуют и зрительные ощущения, и глазодвигательные ощущения, связанные с аккомодацией и стереоскопическим зрением, и осязательные ощущения с их местными знаками, и проприоцепторика всего тела, возглавленная вестибулярными ощущениями тяготения и ускорений, и, несомненно, бесчисленные осколки с других рецепторных систем». То есть, поскольку сформировать сагиттальную мотивацию движения внутри форм при предъявлении их в качестве визуальных стимулов мы можем, погрузив зрителя в виртуальную реальность, что затруднительно, достаточно и необходимо установить, насколько зрительные впечатления

от динамических архитектурных форм будут влиять на:

- аккомодацию и саккады, чтобы установить приоритеты зрительного восприятия;
- формирование афферентационной картины индивидуального пространственного поля зрителя [9], находящегося в покое, в статической позе.

Здесь открывается интересная и значимая перспектива изучения психофизиологического воздействия таких композиционных средств, как:

- выраженно устремленные в каком-либо направлении пропорции в сравнении с более статичными;
- статичное, т. е. организованное в координатах горизонталь-вертикаль (тектоничное), и динамичное (разные виды нестабильных деконструктивистских форм, отдельно биомиметических и физиомиметических) композиционно-геометрическое построение архитектурных форм;
- ритм [10] – чередование статических и динамических форм друг с другом в одном ряду визуальных стимулов;
- метр [10] – исключительно статические и исключительно динамические формы в монотонных рядах визуальных стимулов.

Помимо айтрекинга в ходе эксперимента возможно подключение к инструментальным методам ЭЭГ-, ЭКГ-мониторинга [11] для анализа функционального состояния головного мозга при предъявлении разных стимулов, контроля уровня стресса, включение небольших IQ-тестов для установления взаимосвязи между степенью динамичности архитектурной формы и когнитивных способностей (изменений скорости и объема запоминаемой информации). Также необходимо включение в эксперимент приборов, контролирующих моторные реакции и смещение центра тяжести тела зрителя.

## Литература

1. *Касьянов Н.В.* Архитектура, наука и информационные технологии XXI века // Вопросы теории архитектуры. Архитектура: современный опыт профессиональной саморефлексии : сборник научных трудов и докладов на девярых и десятых Иконниковских чтениях / сост., отв. ред. И.А. Добрицына. М. : ЛЕНАРД, 2017. 432 с.
2. *Полевая С.А.* Интеграция эндогенных факторов в систему обработки экстероцептивных сигналов 03.00.02 – «Биофизика» 03.00.13 – «Физиология». Диссертация на соиск. уч. степ. доктора биол. наук. На правах рукописи. М. : Пушино, 2009.
3. *Полевая С.А., Антонец В.А., Казаков В.В.* Hand-tracking: исследование первичных когнитивных функций человека по их моторным проявлениям // Современная экспериментальная психология : в 2 т. / под ред. В. А. Барабанщикова. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2011. Т. 2. Глава 33. С. 39–53.
4. *Ершов П.М.* Потребности человека. М. : Мысль, 1990. 368 с.
5. *Янковская Ю.С.* Архитектурно-средовой объект: образ и морфология : учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург : Лань, 2021. 236 с.
6. *Титов В.А.* Психофизиология : конспект лекций. М. : «Приор-издат», 2003. 176 с.
7. *Федотов Е.В.* Социальная психология. Вводный курс для бакалавров : учеб. пособие. М. : МПСИ – Н. Новгород : ННГАСУ, 2002. 214 с.
8. *Ефимов А.В.* Формообразующее действие полихромии и вопросы его изучения в архитектурной школе. Дис. на соиск. ученой степени канд. арх. На правах рукописи. М., 1973.
9. *Бернштейн Н.А.* Биомеханика и физиология движений. М. : Институт практической психологии, 1997. 608 с.
10. *Duran G.* Les structures antropologiques de l'imaginaire. 11e edition. Dunod. – Paris, 2011.
11. *Chebereva Olga.* Problems of the System Approach to the Study of Psychophysiology of Aesthetic Emotions Concerning an Architecture // Tenth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications (February 18-22, 2018). Barcelona, Spain AIRIA XPS Press, 2018.

# ADAM – модель искусственной психики

С.А. Шумский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,  
Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),  
serge.shumsky@gmail.com

Предложена модель искусственной психики ADAM, реализующая иерархическую архитектуру глубокого обучения с подкреплением. ADAM способен обучаться все более сложным и протяженным во времени поведенческим навыкам по мере увеличения количества управляющих уровней искусственной психики. Целенаправленное поведение формируется иерархической обучающейся системой с постепенным наращиванием числа уровней, где каждый иерархический уровень ответственен за свой временной масштаб поведения.

## Введение

Под искусственным интеллектом (ИИ) обычно понимают алгоритмы решения различных *когнитивных* задач на уровне человека или лучше. В разные времена под «интеллектуальными» понимались разные типы задач. В 1950-е годы такими считались «творческие» задачи, в которых невозможно предусмотреть заранее все варианты решений: игра в шахматы, доказательство теорем, машинный перевод. С течением времени область ИИ расширялась и пополнялась другими типами когнитивных задач, уже не связанными с логическим интеллектом, например, задачи распознавания образов и моделирования целесообразного поведения животных [1]. Однако все современные системы машинного интеллекта имитируют каждая лишь какую-то одну очень узкую область человеческих способностей, т.е. являются *слабым ИИ*. Задача создания *сильного ИИ*, способного конкурировать с человеком во всех областях, на практике даже и не ставилась. Считалось, что это проблема очень отдаленного будущего.

Перелом во взглядах ИИ-сообщества на сильный ИИ произошел в последние несколько лет после свершившейся в 2010-х *революции глубокого обучения*. В ходе этой (все еще продолжающейся) революции происходит смена основной парадигмы ИИ. Место ИИ, основанного на человеческих знаниях, занимает ИИ, основанный на *машинном обучении*, которому удается решать практически все задачи ИИ в единой методологии, причем с гораздо лучшим качеством, чем прежде [2]. Лидеры революции глубокого обучения сегодня предсказывают переход от моделирования систем бессознательного сенсорного интеллекта к по-настоящему разумным машинам, самостоятельно планирующим свое поведение и «понимающим» что и зачем они делают (рис. 1, 2) [3]. Появление таких разумных машин создаст новый массовый рынок автономных роботов, способных к обучению, в отличие от современных роботов с программируемым поведением.

Иными словами, главной задачей следующего этапа развития ИИ является синтез всех видов интеллекта – сенсорного, моторного, стратегического и других в единой *искусственной психике*, называемой в англоязычной литературе *общим ИИ* – *Artificial General Intelligence (AGI)*. Именно такую цель – создание искусственной психики роботов, позволяющей им самостоятельно планировать достижение поставленных целей и осуществлять эти планы, адаптируясь к изменяющейся обстановке – ставит перед собой Лаборатория когнитивных архитектур МФТИ.

## Когнитивные архитектуры

Искусственная психика представляет собой целостную систему со своей *когнитивной архитектурой*, которая определяет все ее базовые свойства. Поэтому разработка искусственной психики, как и любой сложной системы, должна начинаться именно с проектирования ее архитектуры. Как и архитектура фон-Неймановских компьютеров, когнитивная архитектура подразумевает исполнение самых разных алгоритмов. Только эти алгоритмы должны не закладываться извне программистами в готовом виде, а эволюционировать в процессе обучения. Алгоритмы машинного обучения накапливают и используют *знания* – модели того, как устроен мир, и *навыки* – полезные паттерны поведения в этом мире. И то и другое в идеале тоже должно возникать автоматически в процессе обучения. Однако традиционно большинство когнитивных архитектур до сих пор были основаны на рукотворных правилах.

Несколько огрубляя, скажем, что современный уровень понимания архитектуры нашего мышления может быть суммирован в так называемой *стандартной модели интеллекта* [4], описывающей схему взаимодействия основных типов когнитивных модулей искусственной психики. Как видно из рис. 3, единственным связующим звеном между всеми когнитивными модулями является оперативная *рабочая память*, соответствующая текущей активности в коре мозга. Содержимое рабочей памяти контролируется моделями поведения в базальных ганглиях, управляющих текущей активностью коры – операциями, хранящимися в долговременной *процедурной памяти*. Элементы долговременной *декларативной памяти* коры при активации поступают в рабочую память. Все когнитивные архитектуры, объединяемые стандартной моделью, используют знания, представленные в символической форме (факты и правила). Интерфейс символической рабочей памяти с векторным физическим пространством

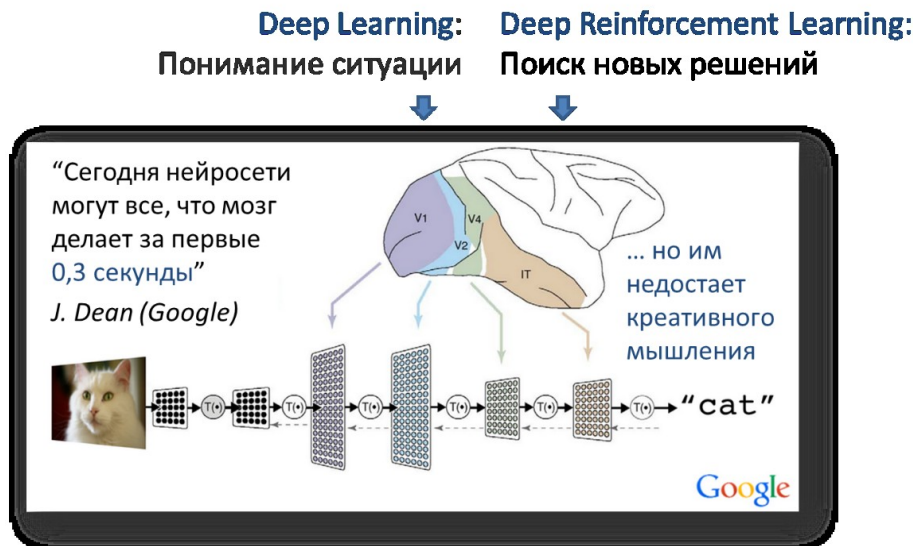


Рис. 1. Переход от машин, распознающих ситуацию, к мыслящим машинам, моделирующим функции лобных долей мозга

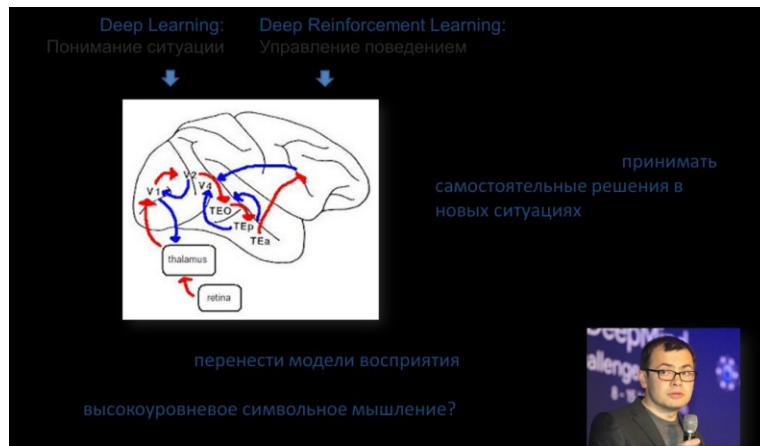


Рис. 2. Мыслящие машины – основа робототехники будущего

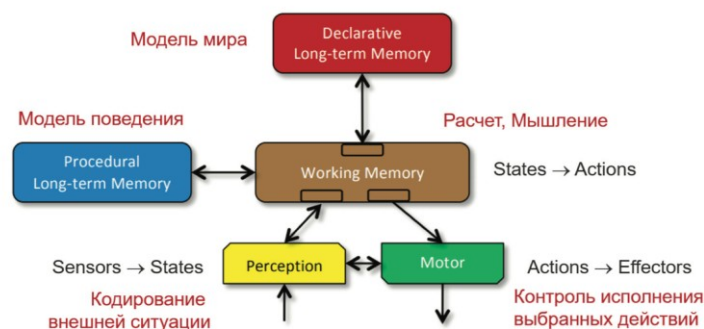
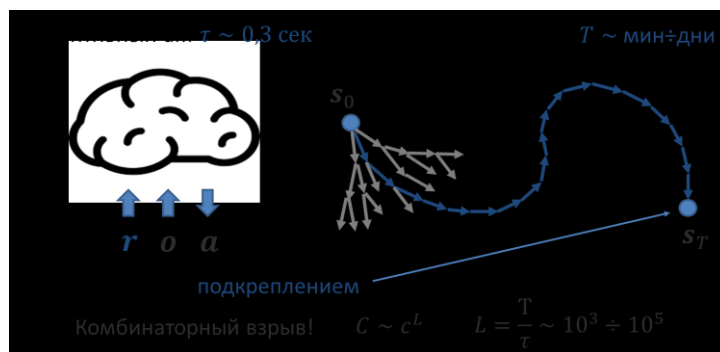


Рис. 3. Стандартная модель интеллекта (Standard Model for the Mind)

обеспечивается специальными кодирующими и декодирующими модулями – соответственно *сенсорными* и *моторными*, в качестве которых могут выступать современные глубокие нейросети.

Важнейшим элементом стандартной модели является идея *когнитивного акта*, стандартной операции выбора и исполнения одного из правил процедурной памяти. Любое сколь угодно сложное поведение состоит из таких элементарных когнитивных актов длительностью в десятые доли

секунды. Вся сложность нашего мышления и поведения возникает в результате правильно подобранных цепочек элементарных когнитивных актов. Стандартная модель суммирует наши знания о механизмах работы мозга и структуре нашей психики. Но она не дает ответа, каким именно образом выстраиваются невероятно длинные осмысленные цепочки когнитивных актов, как организовано планирование нашего поведения на больших масштабах времени – от минут до дней, месяцев и даже лет.



**Рис. 4.** Основная проблема машинного мышления – переход от единичного когнитивного акта к большим горизонтам планирования

Планы в стандартной модели могут задаваться в виде иерархии правил процедурной памяти, где отдельные действия могут содержать в себе различные этапы. Но эти иерархии правил закладываются вручную, а не возникают автоматически, в отличие от иерархии признаков, автоматически возникающих в результате обучения глубоких нейросетей. См. ниже, что пишет автор классического современного учебника по ИИ Стюарт Рассел.

Действительно, хотя в последнее десятилетие ручное программирование правил поведения и уступает место глубокому обучению с подкреплением, обеспечив тем самым прорыв в уровне стратегического игрового интеллекта, иерархическое планирование в глубоком обучении до сих пор отсутствует. Так, успех известной программы AlphaZero обеспечивается потрясающей интуицией ее глубокой нейросети, обученной правильно оценивать любую игровую позицию и находить в ней наилучшие варианты ходов. Однако глубокая нейросеть AlphaZero способна генерировать варианты своих ходов лишь на один шаг вперед. Для выбора наилучшего варианта на каждом шаге Планировщик AlphaZero производит просчет очень объемного дерева вариантов на десятки ходов вперед [5]. Это обеспечивает отличное качество игры, но очень дорогой ценой, из-за комбинаторного взрыва числа возможных комбинаций, перебираемых методом грубой силы.


Человеческое мышление устроено по-другому. Мы не перебираем в уме все возможные варианты цепочек когнитивных актов, что было бы практически невозможно. Мы используем иерархии планов: от крупномасштабного замысла

достижения цели – ко все более подробным планам его достижения. При этом разнообразие вариантов выбора на каждом уровне планирования относительно невелико, а детализируются лишь те этапы, которые реализуются в данный момент (см. рис. 5). Именно так планируют свое поведение люди, и так устроено планирование в предложенной автором когнитивной архитектуре Deep Control, где в процессе обучения автоматически формируется иерархия правил поведения, по аналогии с глубоким обучением, автоматически формирующим иерархии признаков при распознавании образов. Тем самым решается проблема формирования разумного поведения с большим горизонтом планирования, т. е. перекидывается мостик от простейшей психики животных к сложно организованному символическому мышлению.

В отличие от стандартной модели интеллекта, в архитектуру Deep Control иерархичность встроена в явном виде, отражая иерархичность, присущую кортикостриарной системе нашего мозга, управляющей нашим поведением и обучающейся с помощью дофаминовых подкреплений [6] (см. рис. 6, зеленые стрелки).

Другим определяющим принципом архитектуры Deep Control является предиктивное управление, согласно которому наш мозг постоянно предсказывает будущее в контексте своих собственных управляющих воздействий (рис. 6, серые стрелки). Эта особенность нашего мозга хорошо изучена и положена в основу многих теоретических моделей мышления [7, 8]. В отличие от последних, нас интересует действующая модель искусственной психики, являющаяся результатом обратного инжиниринга архитектуры мозга.

В настоящее время все существующие методы иерархического планирования опираются на сгенерированные человеком иерархии абстрактных и конкретных действий. Мы еще не понимаем, как такие иерархии могут быть получены путем обучения



2019



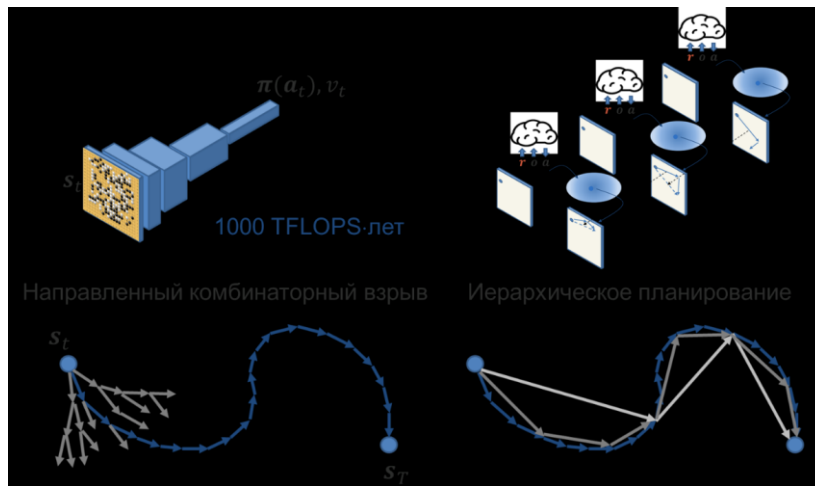


Рис. 5. Пошаговый просчет оптимальной траектории программой AlphaZero (слева) и иерархическое планирование поведения от общего замысла (светло-серый) ко все более детальным планам в архитектуре Deep Control (справа)

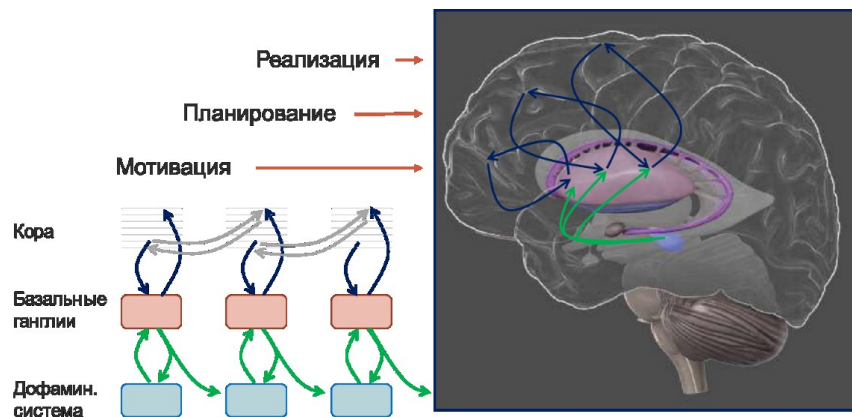


Рис. 6. Кортикостриарная система мозга, управляющая целесообразным поведением, устроена иерархически. Программа поведения формируется сверху вниз, от мотивации к намерению, планированию и реализации поведения. Все уровни иерархии имеют одинаковый набор модулей, представленных в различных частях коры, базальных ганглий, таламуса и дофаминовой системы среднего мозга

### Архитектура Deep Control: иерархическое планирование поведения

В архитектуре Deep Control проблема, о которой говорит Стюарт Рассел, – обучение роботов иерархическому планированию поведения, решается с использованием оригинальной технологии *глубокого структурного обучения* [9]. А именно, управление поведением на разных временных масштабах осуществляется в разных вычислительных слоях. Чем выше слой, тем большим временным масштабом он оперирует, решая, по существу, одну и ту же типовую задачу, как показано на рис. 7. Каждый слой управляет взаимодействием с внешним миром, предсказывая свое очередное дискретное *состояние*, кодирующее на своем временном масштабе *сенсомоторную* информацию – как входящую (*наблюдения*), так и исходящую (*действия*). То есть любой план действий сопровождается соответствующими предсказаниями наблюдений, которые постоянно сравниваются с реальностью, поставляя материал для обучения даже в отсутствие подкрепляющих

сигналов, что выгодно отличает Deep Control от обычного глубокого обучения с подкреплением. На рис. 7 показано два первых слоя Deep Control, на примере которых мы поясним, как именно происходит управление поведением в этой архитектуре.

Входная информация поступает в управляющую систему (искусственный мозг робота) из внешнего мира в виде единого сенсомоторного вектора  $x_t = (r, o, a)_t$ , объединяющего показания всех сенсоров и актуаторов управляемой системы (тела робота) в данный момент дискретного времени. Показания одного из сенсоров выделены в отдельный *подкрепляющий сигнал*  $r$ , который служит для обучения системы и обрабатывается особым образом. В ответ управляющая система выдает прогноз следующего сенсомоторного вектора в очередной момент времени  $\hat{x}_{t+1} = (\hat{r}, \hat{o}, \hat{a})_{t+1}$ , а именно – прогноз показаний всех сенсоров, которые она не контролирует, и *реальные* управляющие сигналы для всех актуаторов управляемой системы, которые она контролирует.

Входным элементом каждого слоя является *Кодер*, который кодирует непрерывный векторный сигнал набором дискретных символов  $x_i \rightarrow s_i$ , т. е. осуществляет дискретное кодирование. В простейшем варианте Кодер состоит из нескольких модулей, каждый из которых производит свой вариант кластеризации входных векторов, сохраненных в *эпизодической памяти*. Как показано на рис. 8, разнообразие дискретных кодов возрастает экспоненциально с числом модулей, так что требуемого для управления разнообразия всегда можно добиться даже с небольшим числом модулей.

В мозге дискретное кодирование производится гиперколонками неокортекса (выделенными разными цветами на рис. 8), так как из-за взаимной конкуренции колонок активной в каждой гиперколонке может быть лишь одна колонка. Такие гиперколонки размером порядка  $1 \text{ мм}^2$  были экспериментально исследованы Маунткаслом [10], а их теоретическая модель предложена Кохоненом [11] (рис. 9).

Дискретный сигнал из Кодера передается в *Парсер*, аналог рабочей памяти в стандартной модели. Парсер производит анализ временного ряда поступающих к нему символов, выделяя в нем характерные цепочки символов, *морфемы*  $w_i$ . Таким образом Парсер формирует укрупненное описание текущего контекста уже в виде цепочек морфем, а не символов. По мере накопления опыта Парсер обучается выявлять все более крупные морфемы, рекурсивно объединяя между собой наиболее часто встречающиеся пары более коротких морфем, начиная с единичных символов. Выявление и запоминание морфем в мозге может осуществляться гипотетическими *рекурсивными модулями* коры, отличающимися тем, что они «смотрят» сами на себя и поэтому способны кодировать временные последовательности (рис. 10).

Силы ассоциативных связей между кодами морфем, отражающие то, как часто морфема  $w_i$  следует за морфемой  $w_j$ , образуют *семантическую память*  $R_{w_i w_j}$ , названную так потому, что она отражает характер употребления морфем, от которого только и зависят значения действий. Действия, осуществляемые в сходных ситуациях, т. е. перед и после определенных действий, имеют, очевидно, сходные назначения, аналогично тому, как значения слов в языке определяются контекстами их употребления. Семантическая память  $R_{w_i w_j}$  помнит, какие следующие морфемы (т. е. цепочки сенсомоторных состояний) и насколько часто встречались в данном контексте. Это наша модель мира, хранящаяся в неокортексе. К этой модели мира надо добавить еще и модель своих собственных предпочтений – насколько желанны для нас различные состояния мира. Эти предпочтения, выявляемые в процессе обучения с подкреплением, задаются отдельной *функцией ценности*  $V_w$ , за которую в мозге отвечают базальные ганглии. Семантическая память и функция ценности обучаются Парсером, который распознает и порядок

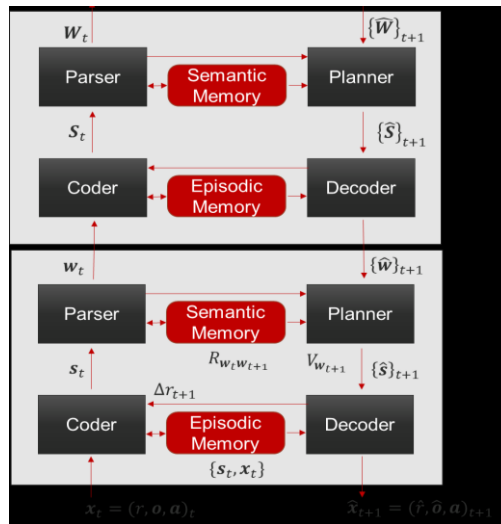
следования морфем и соответствующие им подкрепления.

Модель мира и модель наших предпочтений используются *Планировщиком* для планирования поведения. Если вычислительный слой является последним в стеке, то информация о текущем контексте, распознанным Парсером, передается непосредственно Планировщику. Зная последнюю распознанную морфему, какие морфемы могут следовать за ней и ценность каждой такой морфемы-кандидата, Планировщик выбирает оптимальную в данном контексте следующую морфему, которая и становится его текущим планом.

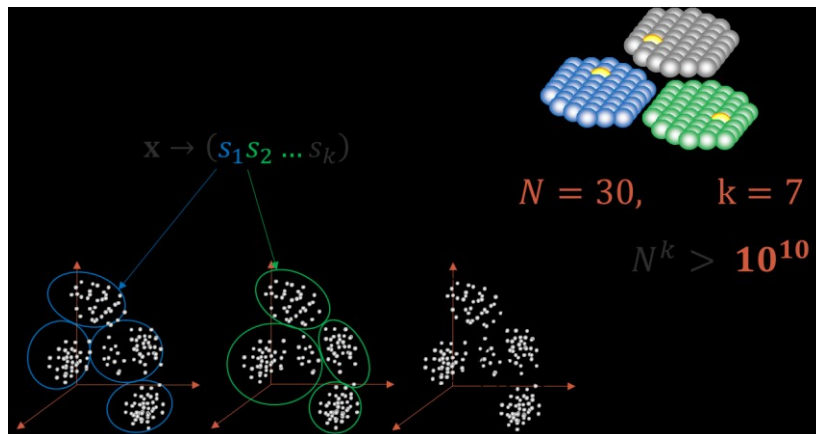
Этот план затем пошагово транслируется *Декодеру*. В первом слое Декодер переводит его из символической формы в векторную, т. е. предсказывает следующий сенсомоторный вектор, значит, непосредственно взаимодействует с внешним миром. В остальных слоях Декодер формирует с помощью своей эпизодической памяти *планы* для Планировщика нижележащего слоя – ранжированный список возможных морфем-кандидатов, из которого последний выбирает оптимальную для текущего момента морфему. Тем самым каждый слой выбирает наилучший вариант исполнения планов вышележащего слоя с учетом поступающей от нижележащего слоя входной информации.

Информация от нижележащего слоя передается в вышележащий слой Парсером в момент распознавания им очередной морфемы. Эта морфема передается Кодеру вышележащего слоя в форме семантического вектора для его последующего дискретного кодирования. Семантический вектор каждой морфемы определяется частотами морфем, предшествующих и следующих за данной морфемой. Таким образом, морфемы, употребляемые сходным образом, будут иметь близкие семантические вектора и соответственно будут закодированы Кодером следующего слоя близкими дискретными кодами с большим числом одинаковых компонент.

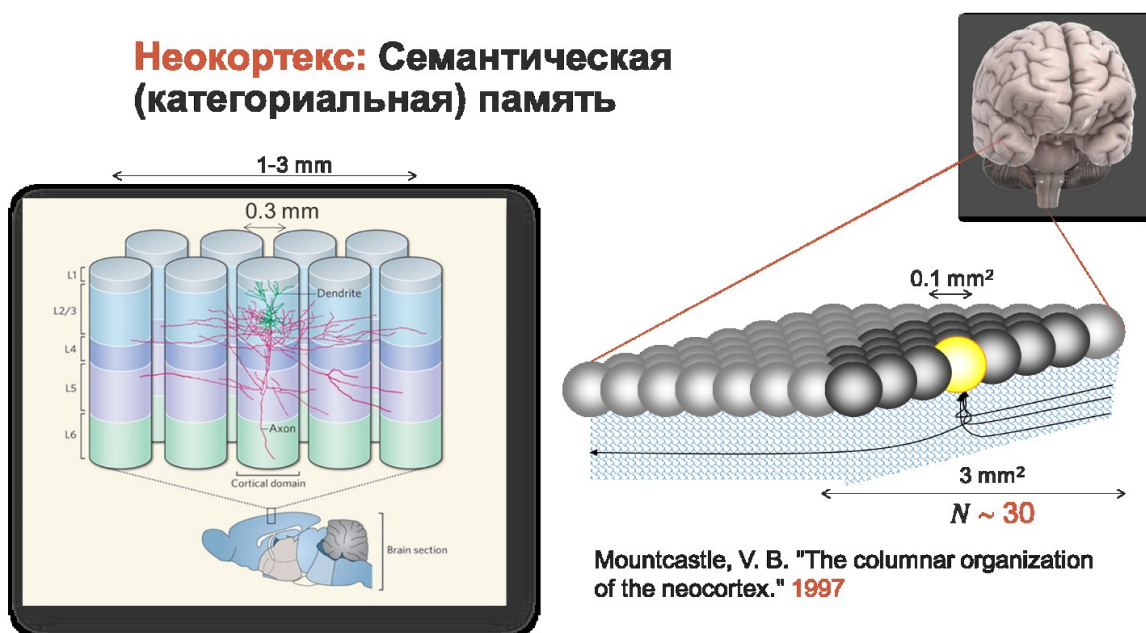
Итак, мы описали в общих чертах, как в архитектуре Deep Control происходит формирование иерархии планов поведения, вложенных друг в друга и постоянно адаптирующихся к изменяющимся внешним обстоятельствам. Заметим, что от нас не требовалось задавать никаких правил поведения. Все паттерны поведения, кодируемые морфемами на каждом временном масштабе, появляются автоматически в процессе активного взаимодействия системы с внешним миром, на основе полученных при этом данных. Искусственный мозг с такой архитектурой способен автоматически формировать свою картину мира и постоянно совершенствовать свое поведение, нацеленное на максимизацию ожидаемого потока подкреплений. Он не ограничен решением какой-то одной определенной задачи и может накапливать опыт решения разных задач в разных контекстах, постоянно накапливая знания о мире и своем опыте взаимодействия с ним.



**Рис. 7.** Архитектура Deep Control представлена однотипными вычислительными слоями, осуществляющими управление поведением каждый на своем временном масштабе. Чем выше слой, тем большим временным масштабом он оперирует. Каждый слой находит на своем масштабе решение локальной задачи, поставленной для него более высоким слоем, разбивая ее на подзадачи для более низкого слоя

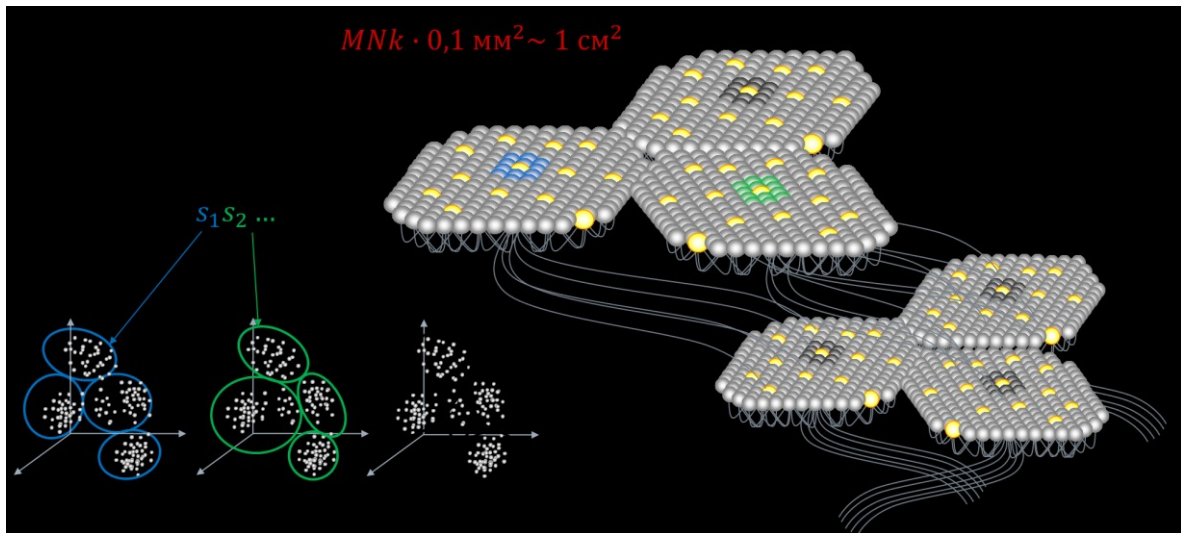


**Рис. 8.** Дискретное кодирование в Кодере. Разнообразие дискретных кодов в случае 7 модулей, по 30 кластеров в каждом, превышает  $10^{10}$



### Неокортекс: Семантическая (категориальная) память

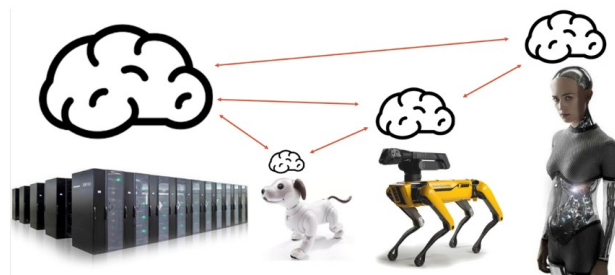
**Рис. 9.** Дискретное кодирование в неокортексе



**Рис. 10.** Гипотетические рекурсивные модули неокортекса, соответствующие архитектуре Deep Control. Центральная гиперколонка каждого модуля с глобальными связями кодирует свою входную информацию активностью одной из своих кортикальных колонок. Окружающие ее гиперколонки с локальными связями кодируют последовательности таких символов в центральной гиперколонке, т. е. морфемы

**Действующие модели искусственной психики,  
как прототипы новых архитектур сильного ИИ**

- Программных (операционная система роботов)
- Аппаратных (чипы искусственного мозга роботов)



**Рис. 11.** Конечные цели проекта ADAM

**ADAM:**

**прототип искусственной психики роботов**

ADAM представляет собой действующий прототип искусственной психики с архитектурой Deep Control, разрабатываемый в лаборатории Когнитивных архитектур МФТИ с целью проверить работоспособность предложенного подхода и апробировать различные алгоритмы обучения для новой архитектуры. Разработанная и отлаженная в рамках проекта ADAM архитектура сильного ИИ может использоваться в самых разных сервисах и

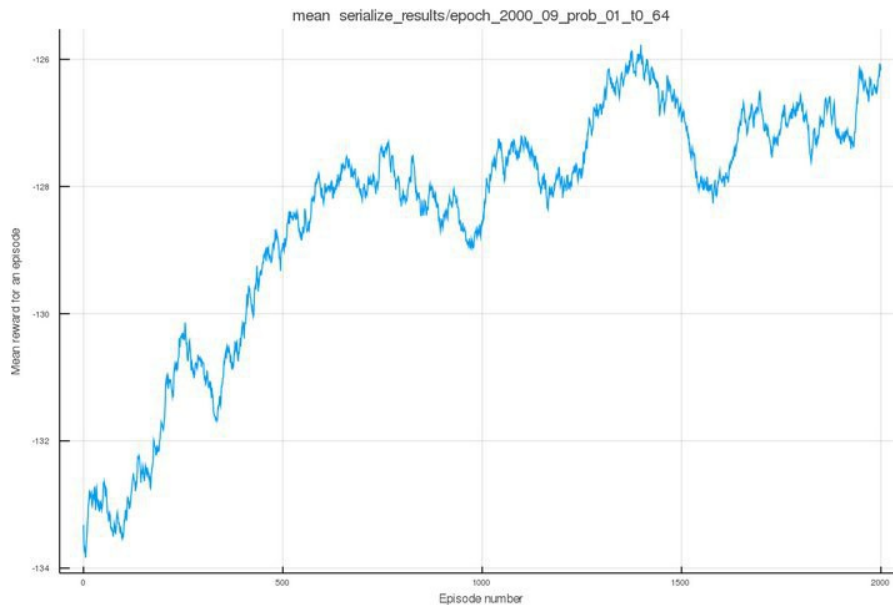
продуктах, требующих креативного машинного мышления. Мы надеемся, что эта архитектура будет положена в основу будущих операционных систем роботов и специализированных чипов их искусственного мозга.

ADAM представляет собой программу на языке Julia, управляющую поведением робота или программного агента в симуляторе реальности:  $environment(a, o)_t \rightarrow (r, o)_{t+1}$ . Псевдокод программы может быть представлен в следующем виде:

```

ADAM (parameters, (r, o, a)1:t) → (r̂, ô, a)t+1
track_record[1] ← explore_environment(environment) # gather initial learning data
adam ← new_adam(parameters) # create new adam
adam.layer[L=1] ← new_layer(adam, track_record[1]) # initiate first layer of adam
while(stop_criteria)
    r̂, ô, a ← predict!(adam, r, o, a) # generate new action/prediction
    if (expand_criteria) adam.layer[L+1] ← new_layer(adam, track_record[L+1])
                                                    # create next layer if needed

```



**Рис. 12.** Пример обучения простейшего ADAMA с одним вычислительным слоем и одним модулем задачи MountainCar. Ось абсцисс – количество эпизодов обучения, ось ординат – среднее время достижения результата в каждом эпизоде для 10 различных реализаций обучения (со знаком «-»). В начале цель достигалась в среднем за 134 шага, в конце обучения – за 126 шагов

Первый вариант кода ADAM тестировался на задаче MountainCar из коллекции OpenAI Gym, причем лишь в однослойном варианте. Эксперименты с многослойным ADAMом ведутся в настоящее время на разных задачах из коллекции OpenAI Gym. Предварительные результаты показывают, что ADAM действительно обучается достигать решения задачи за все более короткое время, как показано на рис. 12.

### Заключение

Итак, в данной работе предложена модель искусственной психики ADAM с иерархической архитектурой глубокого обучения с подкреплением. ADAM способен планировать свое поведение на многих масштабах времени, вписывая планы более низких уровней в планы более высоких и согласовывая поток планов, спускаемых сверху вниз, с потоком сенсорной информации, поступающей снизу вверх. По мере накопления опыта взаимодействия с внешней средой и роста числа слоев ADAM обучается целенаправленному поведению на все более долгих временных масштабах. Этот подход может быть использован при создании операционных систем автономных роботов, способных накапливать опыт обучения решению самых разных задач.

### Литература

1. *Russell S., Norvig P.* Artificial Intelligence: A Modern Approach (3rd Edition) Pearson, 2009.

2. *Николенко С., Кадури А., Архангельская Е.* Глубокое обучение. Погружение в мир нейронных сетей. С.-Петербург : Питер, 2018.

3. *Bengio Y.* From System-1 deep learning to System-2 deep learning // NIPS, 2019.

4. *Laird J.E., Lebiere C., Rosenbloom P.S.* A standard model of the mind: Toward a common computational framework across artificial intelligence, cognitive science, neuroscience, and robotics // Ai Magazine. 2017. Т. 38, №. 4. С. 13–26.

5. *Silver D. et al.* Mastering chess and shogi by self-play with a general reinforcement learning algorithm //arXiv preprint arXiv:1712.01815. 2017.

6. *Шумский С.А.* Реинжиниринг архитектуры мозга: роль и взаимодействие основных подсистем // Сборник научных трудов XVII Всероссийской научной конференции «Нейроинформатика–2015». Лекции по нейроинформатике. М., 2015. С. 13–45.

7. *Clark A.* Surfing Uncertainty: Prediction, Action, and the Embodied Mind. Oxford : Oxford University Press, 2015.

8. *Friston K. J.* Waves of prediction // PLoS Biology. 2019. Т. 17, № 10.

9. *Шумский С.А.* Глубокое структурное обучение: новый взгляд на обучение с подкреплением. // Сборник научных трудов XVII Всероссийской научной конференции «Нейроинформатика-2015». Лекции по нейроинформатике. М., 2018. С. 11–43.

10. *Mountcastle V.B.* The columnar organization of the neocortex // Brain: a journal of neurology. 1997. Т. 120, № 4. С. 701–722.

11. *Kohonen T.* Self-organized formation of topologically correct feature maps // Biological cybernetics. 1982. Т. 43, №. 1. С. 59–69.



# Системный принцип в когнитивных исследованиях

В.М. Еськов<sup>2</sup>, В.А. Галкин<sup>2</sup>, Л.С. Шакирова<sup>2</sup>, М.А. Филатов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>БУ ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»

<sup>2</sup>Обособленное подразделение ФНЦ НИИСИ РАН в г. Сургуте

Исследователи в области нейронаук согласны с тем, что нейросети мозга являются сложной системой и поэтому к ним должен быть применен главный системный принцип. Он заключается в том, что динамика поведения отдельного элемента системы (для отдельной части системы, подсистемы) не может точно определять состояния всей системы. С позиции социологии это выглядит так: мнение одного члена коллектива не может представлять весь коллектив (если только в коллективе нет диктатора). В противном случае одна точка  $x(t_i)$  может давать информацию о целой выборке (это будет, если  $x(t_i)$  будет совпадать со статистическим средним  $\langle x \rangle$ ). Подчеркнем, что это противоречит и основам статистики, где среднее  $\langle x \rangle$  может никогда не совпадать с произвольным значимым параметром системы (для любой непрерывной случайной величины  $x(t_i)$ ).

Однако знание  $\langle x \rangle$  все-таки не дает точной информации о возможном распределении (есть еще статистическая дисперсия  $D_x^*$  и т.д.). Очевидно, что любая популяция клеток (в итоге) дает некоторый выходной сигнал (например, в виде электроэнцефалограмм (ЭЭГ) – для популяции нейронов), поэтому нужно работать со всей системой популяции клеток (и людей в социологии). Клетки надо изучать на основе статистических характеристик, которые дадут какое-то представление о всей системе (популяции). Поэтому в медицине работают с ЭЭГ, а не с параметрами определенной клетки [1–4].

Все это очевидные факты, но в физиологии очень часто работают все-таки с отдельными клетками (нейронами, миофибриллами и т.д.), которые в итоге вырабатывают некий общий сигнал (вызванный потенциал – ВП, ЭЭГ, электромиограмма – ЭМГ и т.д.). При работе с одним элементом нарушается базовый системный принцип (один элемент не может представлять систему).

Особенно наглядно это наблюдалось в наших исследованиях на популяциях дыхательных нейронов, когда отдельный нейрон мог изменять свою активность (вообще прекратить генерацию сигнала), но на выходе коллективной нейросети (инспираторной нейросети – ИНС, экспираторной нейросети – ЭНС) всегда наблюдался некий обобщенный сигнал.

Этот сигнал регистрировался в виде активности экспираторной или инспираторной нейросети, например, как активность межреберных нервов или диафрагмального нерва и далее в виде электромиограмм соответствующих дыхательных мышц (межреберных или диафрагмальной). В итоге мы регистрировали некоторую интегральную активность в виде электромиограмм (ЭМГ)

или электромиограмм, которые анализировались в рамках статистики. Аналогично изучается и ЭЭГ человека, находящегося в определенном физиологическом состоянии [4–8].

Возникает закономерный вопрос: насколько статистически устойчивы параметры ЭНГ, ЭМГ человека (или животного), находящегося в его неизменном физиологическом, физическом состоянии (например, в покое). Постановка этой проблемы весьма тесно связана с проблемой выбора стандартов и нормы для любого физиологического состояния. Например, для параметров функциональной системы организма (ФСО) человека как в норме, так и при различных патологиях (в медицине). Может ли быть стандарт вообще в биомедицине? Может ли сохраняться неизменным (и в каком смысле эта неизменность) данное значение  $x_i(t)$ : как точка в фазовом пространстве состояний (ФПС) или  $\langle x \rangle$  ( $D_x^*$ ) для выборки параметров  $x(t_i)$  или в смысле W. Weaver, который ограничил возможности статистики в описании любой биосистемы?

Подчеркнем, что это все фундаментальные вопросы физики, математики и биомедицины, так как точки покоя (неизменности) и интервалы изменений (отклонений от стандарта) составляет основу всей современной детерминистской и стохастической науки (ДСН). Именно в рамках ДСН мы сейчас можем говорить о стандарте как о точке (в теории динамических систем – ТДС), как о неизвестной выборке  $x_i(t)$  в рамках стохастики или еще может быть что-то третье (о чем говорил W. Weaver 70 лет назад). Подчеркнем, этот третий подход в изучении биосистем сейчас и мы развиваем в новой теории хаоса и самоорганизации (ТХС) [5–8].

Именно Weaver (см. Science and Complexity 1948 г.) впервые начал говорить об особенностях живых систем, которые он обозначил как системы третьего типа (СТТ). Эти СТТ Weaver вывел за пределы детерминистской и стохастической науки. Он пытался доказать, что живые системы (СТТ) невозможно описывать в рамках стохастики. Логика рассуждений была следующей: одной точкой в многомерном фазовом пространстве состояний (ФПС)  $x_i(t)$  невозможно описывать. Поведение (состояние) среднестатистического  $\langle x \rangle$  статистической дисперсии  $D_x^*$  спектральной плотности сигнала (СПС), автокорреляции (АК) и т.д. не может быть прогнозируемым, так как ДСН не может описывать СТТ (это было гипотезой W. Weaver).

Выборка может представлять стохастическую систему, но СТТ невозможно описывать одной выборкой. Двадцать лет назад мы доказали, что

любая выборка треморограммы (ТМГ) и теппинграммы (ТПГ), электромиограммы (ЭМГ) является уникальной. Ее невозможно два раза подряд повторить статистически. Вероятность статистического совпадения двух соседних выборок ТМГ  $P_{jj+i} \leq 0,01$ , а для ТПГ  $P_{jj+i} \leq 0,02$ . Все это крайне малые величины, и они доказывают эффект Еськова – Зинченко (ЭЗ) в виде отсутствия статистической устойчивости выборок ТМГ и ТПГ. Любая выборка параметра биосистемы уникальна.

Позже ЭЗ был доказан для сердечно-сосудистой системы (ССС) в виде уникальности выборок кардиоинтервалов (КИ). Наконец, за последние 15 лет был доказан ЭЗ и для электроэнцефалограмм (ЭЭГ). В этом случае мы приходим к доказательству неустойчивости параметров нейросети мозга (НСМ). В спокойном состоянии любой человек не может генерировать (с одного места отведения поверхности мозга) статистически одинаковые выборки (отрезки ЭЭГ).

Это означает, что нейронные сети мозга (НСМ) генерируют непрерывно изменяющиеся биопотенциалы мозга, которые являются статистически неустойчивым процессом. Вероятность статистического совпадения двух соседних ЭЭГ тоже невелика ( $P_{jj+i} \leq 0,3$ ). В итоге мы имеем непрерывный хаос и реверберации в НСМ. Если эти два особых свойства НСМ перенести на работу искусственных нейросетей, то получим метод решения фундаментальной задачи естествознания – возникает возможность системного синтеза, то есть находятся параметры порядка.

В этом случае мы можем моделировать эвристическую работу мозга человека, то есть найти главные диагностические признаки (параметры порядка). Тогда возникает возможность формализовать процедуру системного синтеза, нахождения параметров порядка для любой СТТ. С учетом всего этого мы приходим к логическому заключению об отсутствии возможности использования информации о поведении отдельного нейрона для изучения работы НСМ.

Действительно, работа любого нейрона, который участвует в генерации общего сигнала всей популяции нейронов (отдельной НСМ, например популяции дыхательных нейронов продолговатого мозга и т.д.), не может представлять состояние всей НСМ. Это очевидный феномен, так как целая нейросеть (популяция нейронов, генерирующая ЭЭГ в определенном месте мозга) не может реализовать любое устойчивое состояние. У нас все ЭЭГ (в покое) непрерывно и хаотично изменялись у одного и того же испытуемого. Это доказывает статистическую неустойчивость НСМ, которая сейчас нами обозначается как эффект Еськова – Зинченко [1–6].

Очевидно, что отдельный нейрон, входящий в такую популяцию генерирующих выходной сигнал (на примере ЭЭГ) нейронов, может не только изменять свою активность, но и даже прекратить активность, то есть затухать. Это легко наблюдать при изучении ИНГ дыхательного центра, которые

произвольно меняли свою биоэлектрическую активность. В итоге по анализу активности отдельного нейрона ученые не могут изучать информацию о НСМ. Его активность имеет случайный характер, как и вся ЭЭГ. Во всей электрофизиологии наблюдается нарушение базовых системных принципов. В частности, один элемент, который сейчас часто изучают в нейрофизиологии, систему не может представлять. Изучение по одному нейрону всей системы приводит к потере объективности в оценке поведения НСМ. Эффект Еськова – Зинченко для популяции нейронов (ЭЭГ) доказывает потерю устойчивости выборок целой популяции, что резко усугубляет ситуацию. В итоге как один нейрон не может представлять состояние всей НСМ, так и отдельный отрезок ЭЭГ не может описывать состояние НСМ. Любая выборка ЭЭГ или электронейрограмм – ЭНГ – будет уникальной, она имеет разовый характер и не может объективно представлять работу мозга. Точнее говоря, ЭЭГ имеет исторический характер (в общем случае).

Сейчас во всех нейронауках возникает парадоксальная ситуация: любая выборка ЭЭГ или ЭНГ имеет разовый (уникальный) характер. Она описывает прошлое состояние нейрона или НСМ в целом.

При этом распадаются причинно-следственные связи. Это означает, что знания о прошлой ЭЭГ или ЭНГ не дают нам возможности делать прогноз на будущее состояния НСМ. Прошлое не определяет будущее. Но это нарушает уже базовые принципы ДСН, то есть всей современной науки, где причинно-следственные связи имеют главенствующую роль.

В итоге сейчас мы вынуждены констатировать два фундаментальных факта, которые не учитываются во всей современной нейронауке.

Во-первых, нарушается базовый принцип системности, так как поведение отдельных нейронов не может описывать состояние всей НСМ (один элемент не описывает систему).

Во-вторых, для СТТ (включая и НСМ) выполняется принцип потери причинно-следственных связей (прошлое не определяет будущее состояния НСМ). Об этом уже пыталась сказать группа ученых из США [9].

Очевидно, что в связи с этими двумя базовыми принципами мы вынуждены создать новую (третью) науку, которая отличается от ДСН [5–8]. Эта новая теория хаоса и самоорганизации может обеспечить моделирование эвристической работы мозга на базе искусственных нейросетей. В итоге мы уходим от игнорирования принципов всей теории систем и реализуем все новые принципы работы НСМ: хаос, реверберации, привлечение всех элементов такой искусственной нейросети (ИСНС). В этом случае ИСНС демонстрирует свойства, которые характерны только для нейросетей мозга человека. Такая ИСНС может работать в режиме эвристической работы, то есть находить параметры порядка, которые в рамках ДСН найти невозможно (статистика не работает).



## Литература

1. *Eskov V.M., Filatova O.E., Provorova O.V., Khimikova O.I.* Neural emulators in identification of order parameters in human ecology // *Ekologiya Cheloveka [Human Ecology]*. 2015. № 5. P. 57–64.
2. *Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V., Vokhmina J.V.* Chaotic dynamics of cardio intervals in three age groups of indigenous and nonindigenous populations of Ugra // *Advances in Gerontology*. 2016. № 6(3). P. 191–197.
3. *Eskov V.M., Filatova O.E., Eskov V.V., Gavrilenko T.V.* The evolution of the idea of homeostasis: Determinism, stochastics, and chaos–self-organization // *Biophysics*. 2017. № 62 (5). P. 809–820.
4. *Eskov V.M., Eskov V.V., Filatova O.E., Khadartsev A.A., Sinenko, D.V.* Neurocomputational identification of order parameters in gerontology // *Advances in Gerontology*. 2016. № 6 (1). P. 24–28.
5. *Zilov V.G., Khadartsev A.A., Eskov V.V., Eskov V.M.* Experimental study of statistical stability of cardiointerval samples // *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2017. № 164 (2). P. 115–117.
6. *Zilov V.G., Khadartsev A.A., Eskov V.V., Ilyashenko L.K., Kitanina K.Yu.* Examination of statistical instability of electroencephalograms // *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2019. № 168 (7). P. 5–9.
7. *Zilov V.G., Khadartsev A.A., Ilyashenko L.K., Eskov V.V., Minenko I.A.* Experimental analysis of the chaotic dynamics of muscle biopotentials under various static loads // *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2018. № 165 (4). P. 415–418.
8. *Zilov V.G., Khadartsev A.A., Eskov V.M., Ilyashenko L.K.* New effect in physiology of human nervous muscle system // *Bulletin of experimental biology and medicine*. 2019. № 167 (4). P. 419–423.
9. *Churchland M.M. et al.* Neural population dynamics during reaching // *Nature*. 2012. V. 487. P. 51–56.

# Новые инварианты и новые методы системного синтеза в когнитивных науках

В.В. Еськов<sup>1</sup>, О.Е. Филатова<sup>2</sup>, Г.В. Газзя<sup>2</sup>, Н.Ф. Стратан<sup>2</sup>

<sup>1</sup>БУ ВО ХМАО-Югры «Сургутский государственный университет»

<sup>2</sup>Обособленное подразделение ФНЦ НИИСИ РАН в г. Сургуте

После доказательства статистической неустойчивости выборок любых параметров функций организма человека (в виде эффекта Еськова – Зинченко) во всей биологии, психологии, медицине и нейронауках возникает глобальная неопределенность. Эта неопределенность связана с тем, что любая выборка компонента  $x_i(t)$  вектора состояния биосистемы (включая и мозг человека)  $x = x(t) = (x_1, x_2, \dots, x_m)$  в  $m$ -мерном фазовом пространстве состояний (ФПС) будет уникальной. Ее невозможно 2-й раз повторить произвольно, так как это доказано в эффекте Еськова – Зинченко (ЭЭЗ).

Напомним, что еще в 1948 году W. Weaver (один из основателей теории информации) пытался доказать, что живые системы (системы третьего типа (СТТ) в его классификации) не могут описываться в рамках детерминистской и стохастической науки (ДСН). W. Weaver говорил о том, что одна точка не может описывать статистические объекты (нужна выборка  $x_i(t)$ ). Сейчас мы говорим, что одна выборка не может описывать живые системы. СТТ не является объектом современной ДСН, так как ЭЭЗ доказывает отсутствие статистической устойчивости выборок любых параметров организма человека.

Тогда возникает проблема выбора стандарта (нормы) в биомедицине, и как тогда идентифицировать стационарные режимы СТТ? ДСН ответы на эти вопросы не может дать в принципе из-за ЭЭЗ и уникальности любой выборки СТТ. В этом и заключаются главные Complexity и Uncertainty, о которых говорили нобелевские лауреаты (I.R. Prigogine, В.Л. Гинзбург, R. Penrose, M. Gell-Mann) и другие выдающиеся ученые (J.A. Wheeler и др.).

Мы сейчас разрабатываем новую теорию хаоса и самоорганизации (ТХС), в которой вводятся новые понятия и новые законы (модели) для описания поведения параметров  $x_i(t)$  любой СТТ. Напомним, что в ТХС сам ЭЭЗ был доказан на основе многократных повторных регистраций выборок параметров  $x_i(t)$  у одного и того же человека (по 15 повторений) или группы испытуемых в режиме 225 повторных регистраций выборок параметров треморограмм (ТМГ), теппиграмм (ТПГ), электромиограмм (ЭМГ), электронейрограмм (ЭНГ), электроэнцефалограмм (ЭЭГ), кардиоинтервалов (КИ) и многих других параметров  $x_i(t)$  функций организма человека.

В итоге за двадцать лет многократных регистраций выборок у 20000 человек (в покое и при действии разных факторов) мы не только доказали ЭЭЗ, но и доказали реальность новых инвариантов для описания параметров организма человека.

В качестве простейших инвариантов мы предлагаем рассчитывать числа  $k$  пар выборок в каждой матрице парных сравнений, которые получаются у одного испытуемого или целой группы при многократных повторениях измерений [1–3].

Эти числа и характеризуют механизм регуляции тех или иных функций организма человека и работу всей его центральной нервной системы (ЦНС). Для иллюстрации реальных возможностей таких чисел  $k$  в спокойном состоянии организма человека мы предлагаем матрицу парных сравнений выборок параметров КИ для одной группы испытуемых из 15 женщин одинакового возраста и длительно проживающих на Севере РФ в Югре.

Для получения этой табл. 1 мы регистрировали по 225 раз выборки КИ у каждой испытуемой и строили 15 матриц парных сравнений для 15 пар выборок в каждой такой матрице. В итоге для каждого человека из группы мы рассчитывали 15 матриц парных сравнений выборок КИ. В этих 15 матрицах мы находили числа  $k$  пар, для которых критерий Вилкоксона  $p \geq 0,05$ . Это означает, что такая пара может иметь одну, общую генеральную совокупность [3, 4].

В итоге для каждого испытуемого мы рассчитали по 15 матриц и получили выборку чисел  $k$  (15 значений  $k$  в такой выборке) на основе расчета 225 выборок КИ. В итоге для 15 человек мы получили 15 выборок чисел  $k$ , которые попарно сравнили. Была построена матрица таких парных сравнений выборок  $k$ , в которую вложили критерии Вилкоксона  $p$ . Если  $p_{ij} \geq 0,05$ , то считалось, что пара выборок  $k$  статистически совпала (см. табл. 1).

Напомним, что матрицы парных сравнений самих выборок КИ содержали числа пар ( $p \geq 0,05$ ) не более 15%. Это доказывало ЭЭЗ. В табл. 1 мы сравнили 15 выборок чисел  $k$  для 15 разных испытуемых, в каждой такой выборке было по 15 значений  $k_k$ . В итоге такая матрица показала очень высокий процент (более 95%) статистических совпадений выборок значений  $k$  для всех 15 женщин. Очевидно, что это число  $k_k$  доказывает однородность группы, но в рамках статистики группа неоднородна.

С позиций обычной статистики данная группа из 15 человек не однородна, так как в матрице парных сравнений (было построено 15 таких матриц для группы) число статистических совпадений выборок КИ не превышало 20% (обычно это число  $k \leq 15\%$  от всех 105 разных пар сравнения). Этот критерий  $k_k$  может говорить об однородности группы, если  $k_k \geq 95\%$ .

Еще одним критерием однородности выборок может быть площадь  $S$  для псевдоаттрактора (ПА),

который описывает данную выборку КИ. Мы считали для каждого испытуемого из группы этих же женщин площади  $S$  для ПА (для каждой выборки КИ из всех 225 выборок (каждой испытуе-

мой)). В итоге были построены для каждого человека из этой группы по одной матрице парных сравнений  $S$  для ПА.

Таблица 1

Матрица парных сравнений выборок чисел  $k$  для 15 разных испытуемых, представленных критерием Ньюмана – Кейлса для каждой  $i$  и  $j$  выборок  $k$  пары сравнений (значимость  $p < 0,05$ , число совпадений  $k_1 = 98$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,23	1,00	1,00
2	1,00		1,00	0,74	0,00	0,16	0,04	0,01	0,08	0,02	1,00	0,30	0,00	0,23	0,00
3	1,00	1,00		1,00	0,41	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,01	1,00	0,63
4	1,00	0,74	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,51	1,00	1,00
5	1,00	0,00	0,41	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	0,16	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,00	0,04	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	1,00	0,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
9	1,00	0,08	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
10	1,00	0,02	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
11	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	0,20	1,00	1,00
12	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00	1,00	1,00
13	0,23	0,00	0,01	0,51	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,20	1,00		1,00	1,00
14	1,00	0,23	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		1,00
15	1,00	0,00	0,63	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Таблица 2

Матрица парных сравнений 15 выборок  $S$  псевдоаттракторов для одного испытуемого в режиме 225 одинаковых измерений выборок КИ, представленных критерием Вилкоксона (значимость  $p < 0,05$ , число совпадений  $k_2 = 94$ )

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		0,16	0,64	0,57	0,05	0,95	0,78	0,13	0,82	0,65	1,00	0,17	0,11	0,09	0,14
2	0,16		0,05	0,10	0,65	0,19	0,31	0,57	0,46	0,50	0,13	0,82	0,83	0,88	0,95
3	0,64	0,05		0,65	0,03	0,78	0,46	0,02	0,61	0,61	0,86	0,05	0,03	0,02	0,13
4	0,57	0,10	0,65		0,04	0,73	0,57	0,05	0,25	0,91	0,57	0,07	0,02	0,03	0,09
5	0,05	0,65	0,03	0,04		0,19	0,23	0,59	0,23	0,16	0,13	0,43	0,78	0,46	0,65
6	0,95	0,19	0,78	0,73	0,19		0,17	0,03	0,50	0,95	0,95	0,28	0,10	0,11	0,21
7	0,78	0,31	0,46	0,57	0,23	0,17		0,09	0,65	0,95	0,82	0,21	0,08	0,16	0,28
8	0,13	0,57	0,02	0,05	0,59	0,03	0,09		0,11	0,36	0,08	0,46	0,53	0,23	1,00
9	0,82	0,46	0,61	0,25	0,23	0,50	0,65	0,11		0,92	0,86	0,86	0,50	0,50	0,57
10	0,65	0,50	0,61	0,91	0,16	0,95	0,95	0,36	0,92		0,86	0,50	0,09	0,50	0,61
11	1,00	0,13	0,86	0,57	0,13	0,95	0,82	0,08	0,86	0,86		0,43	0,08	0,24	0,21
12	0,17	0,82	0,05	0,07	0,43	0,28	0,21	0,46	0,86	0,50	0,43		0,73	0,65	0,73
13	0,11	0,83	0,03	0,02	0,78	0,10	0,08	0,53	0,50	0,09	0,08	0,73		0,78	0,95
14	0,09	0,88	0,02	0,03	0,46	0,11	0,16	0,23	0,50	0,50	0,24	0,65	0,78		0,61
15	0,14	0,95	0,13	0,09	0,65	0,21	0,28	1,00	0,57	0,61	0,21	0,73	0,95	0,61	

В итоге мы имели 15 выборок  $S$  для ПА и в каждой такой выборке было по 15 значений  $S$  для каждого испытуемого. Расчет матриц парных сравнений таких 225 выборок (всего 15 человек, и было построено 15 таких матриц парных сравнений выборок  $S$  для ПА). Для примера мы представляем одну типовую матрицу парных сравнений  $S$  для одного испытуемого (табл. 2).

Очевидно, что число  $k_S$  пар выборок  $S$ , для которых  $p_{ij} \geq 0,05$  довольно значительное (у нас  $k_S =$

$= 96$ ). Обычно в спокойном состоянии эти числа  $k_S \geq 95 \%$ , что удовлетворяет требованиям традиционной статистики. Такой результат для  $S$  также доказывает, что площади  $S$  для ПА могут быть инвариантами при неизменных стационарных состояниях ССС и оценке однородности группы.

Таким образом, за последние 20 лет мы доказали ЭЭЗ и предложили два новых инварианта в оценке параметров функций организма. Подобные результаты мы получили и для электромиограмм

(ЭМГ), и для электроэнцефалограмм (ЭЭГ). Площадь  $S$  для ПА у выборки ЭЭГ или ЭМГ может быть инвариантом для оценки стационарных режимов или стандарта. При этом и числа  $k$  тоже могут быть инвариантами в выборках ЭЭГ или разных состояниях испытуемого.

### Литература

1. *Filatova O.E., Bashkatova Yu.V., Shakirova L.S., Filatov M.A.* Neural network technologies in system synthesis // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2021. V. 1047. Art. 012099 ; doi:10.1088/1757-899X/1047/1/012099.
2. *Filatova O.E., Pyatin V.F., Filatov M.A., Shakirova L.S.* The low temperature influence on cardiointervals under physical training of man // *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2021. № 1. P. 17–21.
3. *Grigorenko N.B., Nazina V.V., Filatov M.A., Chempalova L.S., Tretyakov S.A.* New information technologies in the estimation of the third type systems // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1889. Art. 032003 ; doi:10.1088/1742-6596/1889/3/032003.
4. *Khadartsev A.A., Eskov V.V., Pyatin V.F., Filatov M.A.* The use of tremorography for the assessment of motor functions // *Biomedical engineering*. 2021. V. 54, № 6. P. 388–392.

# Сложные системы и происхождение когнитивной способности человеческого интеллекта

Ю.Т. Каганов, М.Б. Оселдчик

МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва  
email: yurijkaganov@gmail.com, fobos3000@gmail.com

Одной из наиболее захватывающих проблем современности является проблема естественно-научного объяснения человеческого интеллекта. Эта проблема в настоящее время охватывает широкий спектр разных исследовательских программ. Она тесно связана с исследованиями в области искусственного интеллекта, а также со всем кругом исследований в области когнитивных наук. В работе рассматривается попытка использования современных представлений о динамике сложных систем для объяснения того, каким образом возможно формирование человеческого интеллекта.

В 70-х годах XX века сформировалась новая парадигма науки, которая представляет собой научную концепцию, основанную на понятии сложности систем. Эта концепция базировалась на идеях самоорганизации сложных нелинейных динамических систем. Она оформилась в виде трех основных направлений.

1. «Синергетика», автором которой был специалист в области физики твердого тела (лазеров) – немецкий физик Герман Хакен [1].

2. «Теория диссипативных систем», которую разрабатывал бельгийский физик Илья Романович Пригожин. Он получил Нобелевскую премию за работы в области неравновесной нелинейной термодинамики [2].

3. «Теория гиперциклов». Это направление было предложено австрийским физико-химиком Манфредом Эйгеном, работавшим в области химической кинетики и также получившим Нобелевскую премию. Его работы были посвящены проблеме происхождения предбиологических систем [3].

Введем основные понятия теории динамических систем [4].

- **Динамическая система** – множество элементов, для которого задана функциональная зависимость между *временем* и *положением* в *фазовом пространстве* каждого элемента системы.

- Данная **математическая абстракция** позволяет изучать и описывать эволюцию систем во времени.

- **Состояние** динамической системы в любой момент времени описывается множеством вещественных чисел (или векторов), соответствующим определенной точке в *пространстве состояний*.

- **Эволюция динамической системы** определяется детерминированной функцией, то есть через заданный интервал времени система принимает конкретное состояние, зависящее от текущего.

- **Аттрактор** – это некоторое «сложно устроенное» множество в фазовом пространстве, к которому притягиваются почти все траектории из его некоторой окрестности.

Дискретизация фазового пространства динамической системы позволяет перейти от непрерывного представления фазовой траектории к ее дискретному представлению, которое может быть интерпретировано как последовательность символов. Это, в свою очередь, дает возможность представить динамическую систему как систему символического отображения.

Аттракторы представляют собой устойчивые структуры, которые можно интерпретировать как слова, построенные на символах, составляющих их фазовое пространство. Их зависимость от воздействия внешней среды определяется изменением параметров динамических систем, что влечет за собой возникновение бифуркационных процессов и формирования новых аттракторов. Такой подход дает возможность понять суть процессов формирования информации и возникновения семантики. Иерархия целей, которые формируют динамические процессы, определяет иерархию различных видов и уровней информации.

**Информация** есть запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных [5].

**Процесс запоминания** можно интерпретировать как формирование аттракторов.

Семантика возникает, когда воздействие внешней среды оценивается системой на основе некоторой шкалы, определяемой целью. В результате формируется система аттракторов, которая определяет поведение системы. В свою очередь, аттракторы формируют реакцию системы на внешние воздействия, что и характеризует ее прагматику. Иерархическая структура аттракторов формирует, в свою очередь, систему уровней языков, состоящих из различного типа символов. На каждом уровне имеется своя символика, определяемая той средой, в которую погружена система аттракторов, и, соответственно, семантикой, определяемой этой средой. Взаимодействие между языками происходит путем формирования иерархии структур системы аттракторов [6].

Основная проблема формирования интеллектуальных систем – это самопорождение смысла [7]. Смысл возникает в результате взаимодействия динамической системы и окружающей среды, при котором в результате самоорганизации система аттракторов более низкого уровня (элементы языка более низкого уровня) формирует аттракторы более высокого уровня (элементы

языка более высокого уровня). Эти аттракторы соответствуют состоянию системы, которое позволяет ей сохранять свою качественную определенность («жизнь») при взаимодействии с окружающей средой. В результате при изменении состояния внешней среды меняются параметры динамической системы, что порождает цепочки бифуркаций в динамической системе, а это, в свою очередь, ведет к изменению состояния динамической системы на более высоком уровне и соответствующей реакции на действие окружающей среды, позволяющей ей адаптироваться к этим изменениям. Структура аттракторов на самом верхнем уровне определяет характер будущих реакций, необходимых для адекватного ответа на воздействие внешней среды. В этом состоит смысл построения «картины мира» у сложной нелинейной динамической системы. Это осуществляется на основе создания языковых структур верхнего уровня, отражающих, с одной стороны, наиболее важные для системы свойства окружающей среды, а с другой – позволяющих формировать необходимые реакции для «выживания» этой системы в окружающей среде. Такое представление о системе выживания сложной интеллектуальной системы подводит к проблеме происхождения интеллекта.

Если пытаться определить понятие **интеллект** (вероятно, это понятие одно из самых загадочных и ускользающих от точного определения), то одно из определений можно было бы дать такое: **интеллектом** можно назвать способность высокоорганизованных систем к построению моделей окружающего мира и, в связи с этим, к прогнозированию будущих событий (созданию моделей будущего) с учетом иерархии целей, которые эти системы порождают, и формированию адекватной реакции на эти события. Под высокоорганизованной системой понимается как биологическая система любого уровня (от живой клетки до многоклеточного организма), так и искусственная система, обладающая указанными свойствами. Чем же человеческий интеллект отличается от интеллекта других высокоинтеллектуальных животных? Человек в процессе своего филогенетического развития приобрел способность строить модели окружающего мира и прогнозировать события за пределами своей собственной жизни. Это было существенным приобретением, так как позволяло расширить возможности выживания коллектива отдельных индивидов. В этом кроются корни науки и религии.

Многочисленные археологические находки последних лет, исследования антропологов, генетиков и других специалистов постепенно позволяют нарисовать общую картину, дающую понимание происхождения человека современного вида, формирования его мозга и его познавательных способностей. Человечество развивается в изолированных малых группах, накапливает положительные мутации, а затем при контакте с представителями других групп обменивается с ними накопленным генофондом. Эти группы, наряду

с биологическими достижениями, накапливают и культурные, которые затем активно распространяются среди всех членов популяции.

Эволюция привела к формированию черепа современного человека, что, как следствие, физически сформировало мозг современного типа. Именно такой мозг стал основой развития определенного набора познавательных способностей.

Эти процессы дали эффект автокаталитической коэволюции мозга и культуры.

Этот процесс изначально не был и не мог быть линейным. Мозг в его современном строении стал интегральным синергетическим результатом эволюции различных групп людей и диффузии накопленных ими генных модификаций.

Появление на свет очередных поколений людей является итерационным процессом построения стохастических фракталов. Стохастическими называются фракталы, при построении которых случайным образом изменяются некоторые параметры, определяющие структуру фрактала. Человеческие особи воспроизводят самоподобные структуры с небольшими индивидуальными отклонениями в силу передачи потомкам наборов генов двух родителей, что порождает новую особь, несущую наследственную информацию и индивидуальный набор особенностей.

Человеческий мозг является таким же стохастическим фракталом, равно как и комплекс его познавательных способностей. Мозг каждого современного человека подобен мозгу любого другого индивида нашего вида, а познавательные способности являются самоподобными структурами в силу генетической наследственности и социальной детерминированности субъекта, живущего в рамках социума, прививающего ему стиль и способы интеллектуальной деятельности, а также передающего индивиду набор базовых знаний и умений, сообразных историческому и культурному уровню развития данного конкретного социума. При этом каждый мозг является индивидуальным по своему физическому строению, а познавательные способности разнятся по своей силе и другим характеристикам.

Культура, в рамках которой рождается, развивается и живет человек, составляет ту когнитивную парадигму, которая частично усваивается и активно используется индивидом в его повседневной жизни, а частично может быть им усвоена в случае появления прагматической потребности в этом – для решения вставших перед индивидом практических значимых для него задач. Отношение между индивидуальным и парадигмальным содержанием культуры является динамичным в силу постоянного локального диффузионного обмена.

Система знаний, навыков и умений, система компетенций, базирующихся на знаниях, и система познавательных возможностей человека являются неравновесными, динамическими, самоподдерживающимися, самоорганизующимися системами, обладающими свойствами открытости, нелинейности и диссипативности.

Познавательные способности возникают и развиваются как функции мозга в неразрывной взаимосвязи с усложнением растущих знаний и их объема и распределения в социуме.

Социализация ребенка происходит по аналогии с биогенетическим законом, согласно которому онтогенез представляет собой краткое и быстрое повторение филогенеза. Точно так же социализация происходит по аналогии с историческим процессом становления мозга с набором его познавательных способностей и постепенным усвоением знаний.

Неравномерное распределение знаний среди членов сообщества и разные способы сохранения знаний заставляют познавательные способности развиваться в качестве средств навигации среди различных распределенных знаний.

Развитие знаний и познавательных способностей также является коэволюционным процессом: познавательные способности опираются и реализуются через знания, полученные же и реконфигурированные знания являются результатом действий познавательных способностей.

Система знаний, в свою очередь, является все более и более усложняющейся семиотической структурой в силу своего неразрывного развития во взаимодействии с языком и культурой в целом. Индивид, пользующийся языком как средством коммуникации, вынужден оттачивать свою способность к смыслопорождению, чтобы сформировать сообщение, и способность к смысловосприятию, чтобы извлечь информацию из получаемого сообщения от другого индивида и уметь извлечь информацию, закодированную в объектах культуры и природных объектах.

Усложнение знаний происходит в первую очередь как результат человеческой способности к абстрагированию. Называя какой-то единичный предмет именем, спустя некоторое время человек вырабатывает понятийный категориальный аппарат, который базируется не на единичных предметах и именах, а на родах предметов, выделяя которые он указывает существенные и необходимые признаки предметов данного рода, отвлекаясь от единичных, случайных, несущественных признаков единичного объекта. Таким образом, в основе понятия лежит денотат, связанный с другими денотатами, имеющими прототипы в пределах наблюдаемого мира. А вот система смысла, связанного с этим денотатом, постоянно усложняется и обогащается. Усложнение смысла, в свою очередь, требует более мощных познавательных способностей, чтобы дать индивиду возможность ориентации в конкретной ситуации и конкретной практической деятельности, т. е. возможность применить знания для решения прагматических

задач путем вычленения из общего смысла нужных когнитивных элементов.

Отсюда активное развитие в сообществе традиционной логики со всеми ее инструментами, потому что эти инструменты – способы логического вывода – дают возможность конкретному индивиду не хранить все знания социума в собственной памяти, а использовать тот когнитивный багаж, который у него есть в наличии, для того, чтобы проанализировать новую или нестандартную ситуацию и понять смысл этой ситуации, и сделать необходимые выводы о своем образе действий в данной ситуации.

Знание обладает способностью стимулировать мыслительные процессы.

Наши знания системны: они основаны на локальных системах взаимосвязанных понятий, связанных благодаря существованию их смысловых логических связей.

Систему знаний можно представить в виде множественных графов-схем. Граф-схема – это ориентированный связный граф, задающий последовательность выполнения операций данного алгоритма и содержащий ряд операторных и условных вершин, а также одну начальную и одну конечную вершины. Вершины графа – денотаты, его ребра – предметные отношения.

Такой граф становится разветвленным сложно конфигурированным деревом, являясь отражением сформированной благодаря культуре социума, в котором вырос и набрался знаний индивид, семантической структуры, которая основана на базе объективно существующей системы денотатов. Эта семантическая структура, в свою очередь, входит в целостный семантический комплекс, характерный для культуры данного социума на данном этапе его исторического развития.

Это значит, что этот семантический комплекс опирается на множество взаимосвязанных и пересекающихся в пространстве графов-деревьев.

## Литература

1. *Хакен Г.* Синергетика. М. : Мир, 1980. 404 с.
2. *Николис Г., Пригожин И.* Познание сложного. Введение. М. : Мир, 1990. 344 с.
3. *Эйген М., Шустер П.* Гиперциклы. Принципы самоорганизации молекул. М. : Мир, 1982. 280 с.
4. *Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С.* Основы теории сложных систем. М. ; Ижевск : НИЦ РХД, 2007. 620 с.
5. *Чернавский Д.С.* Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. 288 с.
6. *Майнцер К.* Сложносистемное мышление. Материя. Разум. Человечество. Новый синтез. М. : Книжный дом «Либерком», 2009. 464 с.
7. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М. : КомКнига, 2005. 248 с.



# Смысловые модели когнитивных операций

В.Г. Яхно

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород,  
[yakhno@ipfran.ru](mailto:yakhno@ipfran.ru)

## 1. Введение и методология исследования

Живые системы поражают широким диапазоном и многовариантностью возможных состояний и динамических режимов функционирования. Можно ли разработать формализованный язык для их адекватного описания? Какая методология для этого используется? Какие достигнуты успехи и могут ли быть сформулированы наиболее важные проблемы на сегодняшний день?

В представленном тезисном обзоре рассмотрены подходы, ориентированные на эти вопросы. Адекватное описание режимов функционирования живых систем может быть получено лишь с помощью иерархических модельных архитектур. Базовые модели состоят из балансных уравнений для выбранных переменных, набор решений этих уравнений (динамических режимов поведения) и сопоставление их с экспериментальными данными и представляют собой версию языка модельного описания для изучаемой исследователем области.

Физическая методология демонстрирует свою успешность в формировании адекватного языка описания. Данные экспериментов и опыт исследователя позволяют сформировать аксиоматические предположения, базовые модели, продемонстрировать адекватность полученного языка описания, подтверждение или необходимость коррекции аксиоматических предположений. Аксиоматические предположения фактически представляют собой те наборы экспериментальных закономерностей (выбранные исследователем), которые не вызывают сомнения или об этом договорились с другими исследователями. Полученные языки описания могут быть представлены в виде иерархических уровней для изучаемых областей исследования. Для различных уровней выбираются свои наборы аксиом, из которых следует широкий спектр возможных динамических процессов функционирования системы. Таким образом, создается «искусственная реальность» с адекватным языком количественного описания наблюдаемой, регистрируемой действительности.

## 2. Модели

К настоящему времени известен и представляется удобным для использования следующий вариант классификации базовых моделей.

**2.1.** К базовым моделям 1-го уровня относятся те, в которых процессы трансформации сенсорных сигналов могут приводить к генерации пространственно-временных структур коллективной активности, позволяющих реализовать обработку и выделение из этих сигналов необходимой исследователю информации.

Например, вычисление «элементарных» признаков, формирование требуемых детекторов сигнала и другие аналогичные операции. Такие распределенные системы позволяют изучать режимы параллельного преобразования потока данных. С их помощью удастся вычислять все наперед заданные признаки изучаемого процесса, необходимые для решения поставленной задачи. Например, модели из взаимосвязанных однотипных нейроноподобных элементов позволяют выделять линии искомого направления, объекты интересующего размера, формы, скорости движения и другие важные признаки для решаемой задачи, отсекая «существенный» шумовой фон (см., например, [1–3]).

**2.2.** Отличительная особенность моделей 2-го уровня связана с наличием в их архитектуре таких подсистем, которые, как и в живых системах, позволяют осуществлять генерацию внутренних имитационных (субъективных) сигналов на основе лишь данных о ранее зарегистрированных сигналах из внешнего мира, хранящихся в памяти системы. При этом сигналы на входе системы могут отсутствовать. Динамика обработки информации в таких моделях ориентирована на выполнение необходимых и достаточных операций распознавания, аналогичных бессознательным, осознанным, интуитивным режимам в живых прототипах. Например, такие распознающие системы позволяют описать механизмы непрерывного или дискретного восприятия сигналов от движущихся объектов, а также формирование ощущений о субъективном времени в живой системе. Для этого используются соотношения между временами стробирования сенсорного сигнала (в таламокортикальных сетях) и его осознания в процессе его сопоставления с наиболее правильными «ожидаемыми» сигналами. При этом запоминаются только осознаваемые сигналы [4–8]. Таким образом, удастся формировать язык, адекватно описывающий основные закономерности «элементарных» психологических режимов в естественных и технических распознающих системах.

Рассмотрение проводится в заранее заданной разработчиком области функционирования и позволяет объяснить «простейшие» психологические режимы восприятия сенсорных сигналов [1–8].

**2.3.** Модели 3-го уровня разрабатываются для описания широкого спектра режимов восприятия, регистрируемых в экспериментах с живыми системами, в том числе и «высшие» уровни поведения живых систем. Такие модели конструируются из модулей (моделей 2-го уровня), взаимодействующих в сложной иерархической архитектуре, которая наиболее адекватна изучаемому процессу

в живой системе. Появляется возможность изучать «мозаичную» динамику переключений, когда активные модули в узлах иерархии находятся либо в бессознательных, либо осознанных, либо интуитивных режимах функционирования. Особый интерес представляют архитектуры, в которых основные решения принимают наивысшие управляющие модули, соответствующие экспериментально описываемым «Я-Эго» и «Я-Самость» [9]. Рассмотрены версии интерпретации экспериментальных данных, в которых используется от 3 до 17 уровней управления такими модулями в иерархической архитектуре их взаимодействия. Модели этого уровня позволяют формализовать рассмотрение социальных процессов, а также ряда иррациональных закономерностей. Даже из этого краткого описания нетрудно представить возможное разнообразие режимов поведения, которое можно описать с помощью моделей такого типа [9–15].

**2.4.** Модели 4-го уровня разрабатываются для описания процедур модификации, развития тех иерархических систем, которые в процессе своего функционирования накопили критический уровень ошибочных решений. Таким системам для их выживания требуется привлечение новых алгоритмов и архитектур обработки, позволяющих более адекватно отражать, описывать и понимать сигналы из *природной* среды. Наиболее известные примеры таких перестроек связаны с механизмом каскадных изменений распознающих систем в результате стрессовых состояний [16–17].

С учетом известного аксиоматического утверждения, «что в малом, то и в большом», продемонстрированы возможности управления детальностью описания экспериментальных данных с помощью вариантов из перечисленных иерархических модельных архитектур различных уровней. Фактически, базовые модели (п. 2.1.–2.4.) представляют собой перечень физико-математического инструментария для адекватного описания биологических систем. С его помощью продемонстрированы возможности модельного сжатия данных и единая логика формализации в процедурах сопоставления экспериментальных данных и результатов, полученных на базе этих моделей. В представленном языке описания существует возможность корректировки смысловых понятий в соответствии с имеющимся прецедентным набором экспериментальных данных. Они могут быть применены как к самому исследователю, так и к интересующему его объекту или субъекту изучения. На примерах показана возможность моделирования с помощью упомянутых выше базовых моделей практически всех известных к настоящему времени функциональных операций, реализуемых в живых системах.

### 3. Варианты мировоззренческих позиций

Несомненно, важным остается выяснение материальной природы тех носителей, на которых реализуются разнообразные варианты подсистем

«Я-Эго» и «Я-Самость» в реальной природной среде. Из описания экспериментальных данных следует, что используются представления как о «клеточных», так и об «энергоинформационных» носителях, реализующих активные преобразования информационных сигналов [1–22]. Научное решение этой проблемы возможно на основе процедур согласования и договоренностей между исследователями с разными взглядами. Разнообразие, многовариантность мировоззренческих позиций среди исследователей вносит дополнительные проблемы в процесс формирования научного языка описания когнитивных механизмов. Для визуализации этих проблем можно использовать, например, формализованную схему, в которой результаты моделирования основных признаков динамических состояний живой системы на уровнях «Я-Эго» и «Я-Самость» представлены следующими вариантами [9–15].

**3.1. Атеизм.** Осознанная логика исследований и разработок с опорой на «Я-Эго» осуществляется в рамках «стандартных» моделей, принятых атеистическим корпоративным сообществом. Опора осуществляется на *логическое, модельно-«динамическое», инженерное восприятие*. Результаты ориентированы на создание искусственной, технической реальности.

**3.2. Религиозность.** Обычно для выполнения ритуалов, автоматизмов, чаще в бессознательном режиме, используются корреляционные взаимосвязи и действия. Предпочтение отдается *образному, интуитивно-чувственному восприятию* с опорой на «Я-Эго» и «Я-Самость». Результаты и формируемое *миропонимание*, ориентированы на описание и гармонизирующие изменения «внутреннего мира» живых систем.

**3.3. Богодержавие.** В таком описании используются и осознанные представления об иерархических управляющих связях, и адекватный автоматизм. Опора осуществляется на *текстуально-книжное и образно-ассоциативное восприятие*. Результаты и *миропонимание* ориентированы на описание и реализацию широкого спектра взаимоотношений в социуме. На этой основе возможно также формирование взаимосвязей между представителями мировоззрений «искусственной, технической реальности» и представителями, ориентированными в основном на ощущения «внутреннего мира».

В реальной жизни варианты поведения 3.1.–3.3, естественно, редко проявляют себя в чистом, неизменном виде. Они, конечно же, имеют области переключений в зависимости от внешних обстоятельств. В том числе их «объединение» может происходить через версии крайних состояний и связанных с ними особенностей поведения.

**3.4. Состояние одержимости** в использовании «стандартных» алгоритмов и моделей. Обычно такое поведение направлено на разрушение неосознаваемых компонентов существующего мировоззрения, т. е. происходит сужение областей, представляющих данные об окружающем

мире, «расчеловечивание» личностей (примеры приведены, например, в [23]). Часто люди, попадающие в такое состояние одержимости, считают, что все информационные образы, выходящее за рамки представлений их собственного корпоративного сообщества, просто не могут существовать, поэтому такие образы блокируются с помощью «когнитивных фильтров», не воспринимаются. Более того, сниженный энергетический ресурс у представителей корпоративного сообщества приводит к использованию эмоциональных «выражений» вместо аргументов по обсуждаемой теме. Наблюдается сильное сходство с поведением людей в церковных сектах. Справедливости ради следует отметить, что состояние одержимости родственно понятию доминанты и возникает при необходимости направить максимум интеллектуального ресурса на решение одной очень важной проблемы. При этом остальные проблемы игнорируются. М. С. Казиник говорит, что одержимость свойственна гениям [24]. Так что состояние одержимости, по-видимому, может приводить и к положительным результатам.

**3.5. Проявление любопытства**, поиск и обоснование адекватных гипотез, направленное на создание нового, более широкого, «человечного» мировоззрения. В таком исследовательском состоянии для любой новой информации пытаются найти место, хотя бы на «полочке гипотез». В дальнейшем гипотезы проверяются и либо встраиваются в новую мировоззренческую модель, либо обоснованно отвергаются. Интересные примеры поиска взаимосвязей между взглядами атеистов и религиозно-верующих можно увидеть и изучать в специально организованных интернет-дискуссиях (см., например, [25–28]). Участники, скорее, отстаивают свои версии на основе методологии «Богодержавия». При этом, однако, Всеобъемлющая Управляющая Система называется по-разному: Бог или Законы Природы.

#### 4. Когнитивные фильтры

Особое внимание следует обратить на существование «фильтров», используемых для сокрытия от осознания тех данных, которые сам исследователь или влияющее на него внешнее воздействие заранее решили игнорировать. Такие фильтры используются и в регистрирующей, и в обрабатывающей подсистемах. В рассматриваемых примерах взаимодействующих когнитивных систем обычно это делается через создаваемый контекстом эмоциональный фон, сопровождающий тот или иной вид операционной деятельности.

Приведены примеры фильтруемых данных при конструировании базовых моделей, при описании социальных и политических процессов, при рассмотрении поведения «когнитивных систем» с разными этическими нормами; игнорирование данных (даже статистически подтвержденных), если они зарегистрированы на основе субъективных ощущений наблюдателей, и ряд других примеров.

С одной стороны, фильтры повышают точность и скорость принятия решений в строго очерченной области изучаемых данных, потому что убираются «шумовые» для достижения поставленной цели сигналы. С другой стороны, если отсеиваются важные детали реально существующих природных взаимосвязей и процессов, то результаты модельного описания могут привести к большой ошибке при сопоставлении их с известными экспериментальными данными.

#### 5. Выводы

Продемонстрирована возможность успешного изучения широкого разнообразия динамических режимов функционирования живых систем с помощью уже разработанных сейчас базовых моделей. Их анализ демонстрирует существование очень широкого спектра динамических режимов (от десятков до сотен, даже тысяч, зависящих от основных параметров системы и ситуаций, в которых она функционирует) как для отдельных подсистем, так и для интегральной системы в целом. Такие результаты позволяют количественно определять области параметров, необходимые для адекватного сопоставления с зарегистрированными данными.

С другой стороны, версии «гармонизирующих» режимов функционирования иерархических систем подразумевают, что в живых системах существует такое управление потенциально возможными режимами, которое может скоординировать процессы в подсистемах под конкретные ситуации функционирования, и соответственно будет оцениваться системой как адекватно-«комфортное» для реализации целей в сложившейся обстановке. Свободный выбор путей «гармонизации» предоставляется жизненной обстановкой для каждой личности.

Рассмотренные модели, несомненно, будут полезны при разработке и реализации адекватных описаний в таких направлениях исследований, как: создание и совершенствование моделей и алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ); разработка прикладных решений для развития сильного ИИ и систем доверительного ИИ; а также проведение исследований, необходимых для учета этических аспектов применения ИИ [29].

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, проект № 14.Y26.31.0022.

#### Литература

1. Яхно В.Г. Модели нейроподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // *Нелинейные волны – 2002* : материалы школы. Нижний Новгород : ИПФ РАН. 2003. С. 90–114.
2. Яхно В.Г., Полевая С.А., Парин С.Б. Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов // *Когнитивные исследования* : сборник научных трудов; вып. 4 / под ред. Ю. И. Александрова, В. Д. Соловьева. М. : Изд-во «Институт психологии РАН», 2010. С. 273–301.

3. Яхно В.Г., Макаренко Н.Г. Поможет ли нам создание «Цифрового двойника человека» лучше понимать друг друга? // Подходы к моделированию мышления / ред. В.Г. Редько. М. : ЛЕНАНД, 2014. 392 с. [Серии «Синергетика от прошлого к будущему», № 70. «Науки об искусственном», № 13]. Гл. 6, с. 169–202.
4. Шмидт Р., Тевс Г. Физиология человека : в 3 т. Здоровье и медицина, 1996. С. 834.
5. Чернавский Д.С. Синергетика и информация. Динамическая теория информации. М. : УРСС, 2004. 288 с.
6. Сергин В.Я. Психофизиологические механизмы осознания: гипотеза самоотождествления // Журн. высш. нерв. деят. 1998. Т. 48, № 3. С. 558–571.
7. Сергин В.Я. Нейронные механизмы сознательно-го восприятия: гипотеза автоотождествления : лекция на XI Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2009» // Лекции по нейроинформатике / под ред. Ю. В. Тюменцева. М. : МИФИ, 2009. С. 35–65.
8. Сергин В.Я. Автоотождествление и сенсорно-моторное повторение как физиологические механизмы сознания // Журн. высш. нерв. деят. 2020. Т. 66, № 2. С. 1–20.
9. Уилбер К. Проект Атман. 1980; *Он же*. Интегральная психология : сознание, дух, психология, терапия. 2000.
10. Внутренний Предиктор СССР. Основы социологии. Санкт-Петербург, 2010. URL: <http://kob.su/kobbooks/osnovy-sotsiologii>.
11. Внутренний Предиктор СССР. От корпоративности под покровом идей к соборности в Богодержавии». URL: <http://medznate.ru/docs/index-53642.html>; Внутренний Предиктор СССР. Об имитационно-провокационной деятельности. Санкт-Петербург, 2001: URL: [http://dotu.ru/files/20010324\\_Imitac\\_prov.pdf](http://dotu.ru/files/20010324_Imitac_prov.pdf).
12. Ефимов В.А. Марафон по 6 приоритетам. Введение. 22 апреля 2021 г. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=ZKW7S8jOjig>.
13. Гурджиев Г. Взгляды из реального мира. М. : АСТ, 2003. 637 с.
14. Мольц М. Я – это Я, или как стать счастливым / пер. с англ. ; предисловие В.П. Зинченко, Е.Б. Моргунова. М. : Прогресс, 1991. 192 с.
15. Хокинс, Давид. Отпуская дискомфортные чувства. Путь принятия. URL: [https://libking.ru/books/religion\\_self/675086-devid-hokins-otpuskaya-diskomfortnye-chuvstva-put-prinyatiya.html](https://libking.ru/books/religion_self/675086-devid-hokins-otpuskaya-diskomfortnye-chuvstva-put-prinyatiya.html).
16. Парин С.Б. Стресс, боль и опиоиды. Об эндорфинах и не только. Минск : Дискурс, 2021. 208 с.
17. Yakhno Vladimir, Parin Serge, Poleyaya Sofia, Nuidel Irina and Shemagina Olga. Who Says Formalized Models are Appropriate for Describing Living Systems?// Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research: IV Selected Papers from the XXII International Conference on Neuroinformatics, October 12–16, 2020, Moscow, Russia. P. 10–33. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60577-3>.
18. Гаряев П.П. Иное понимание модели генетического кода. Теоретический анализ // Open Journal of Genetics, 2015, 5, 92–109. (Published Online June 2015 in SciRes). URL: <http://www.scirp.org/journal/oigen>.
19. Grof S. Adventure of Self-Discovery: Dimension of Consciousness. New perspectives in psychotherapy. State University of New York Press, Albany, 1988.
20. Grof S. The Ultimate Journey: Consciousness and the Mystery of Death. Moscow : Publishing house AST, 2007 (In Russian).
21. Пыжиков А.В. Тайны нашей старины. М. : Издательство «Наше завтра», 2021. 342 с.
22. Пыжиков А.В. Коренная Россия. Былины. Заговоры. Обряды. М. : Концептуал, 2020. 376 с.
23. Шафран Анна и Будина Ольга. Как уничтожить людей, чтобы им это понравилось. URL: <https://youtu.be/rO8wKtSfc00>.
24. Казиник Михаил. Чтобы быть творцом нового, нужно обладать одним отличительным качеством – одержимостью. У кого из композиторов оно было? (Музыка, которая вернулась / Радио «Орфей», Москва, 99,2 FM). URL: <https://orpheusradio.ru/programs/muzyka-kotoraya-vernulas>; Казиник Михаил. Разговор со смыслом (полная версия). URL: <https://www.youtube.com/watch?v=wkNLaTfnO3k>.
25. «НЕ ВЕРЮ!» Иеромонах Геннадий (Войтишко) и доктор экономических наук Александр Бузгалин на YouTube. URL: <https://youtu.be/be4BMEAllZE>.
26. «НЕ ВЕРЮ!» Протоиерей Андрей Ткачёв и Данила Медведев на YouTube. URL: <https://youtu.be/7Ila5AQxTHQ>.
27. «НЕ ВЕРЮ!» Протоиерей Андрей Ткачёв и популяризатор науки Александр Соколов на YouTube. URL: <https://youtu.be/D47LsftdWME>.
28. «НЕ ВЕРЮ!» Протоиерей Александр Абрамов и Анатолий Вассерман на YouTube. URL: <https://youtu.be/6pf23EGakjI>.
29. Дмитрий Чернышенко заявил о старте конкурса на поддержку исследовательских центров по искусственному интеллекту? 15 июля 2021 г. URL: <http://government.ru/news/42776/>.

## Авторский указатель

<b>А</b>		Корнилов М.В.	156	Селезнева Е.И.	138
Абрашкин А.А.	9	Корсаков А.М.	30, 54	Сельский А.О.	119, 142
Аверкина Л.А.	15	Крылов А.К.	58, 60, 63	Семенова Л.Э.	178
Александров И.О.	19	Кузенков О.А.	65	Семенова Н.И.	131
Александрова Н.Ш.	7	Кузнецов А.А.	69	Семенова Т.Е.	183
Алексеев А.К.	11	<b>Л</b>		Семячкина- Глушковская О.В.	131
Антонец В.А.	23, 81	Лахгайн Б.	15	Сергеев К.С.	131
Астапова Л.А.	30, 54	Лачинова Д.А.	72	Симомян М.С.	144, 167
Ашина Н.П.	170	Лебедев А.А.	45	Ситникова Е.Ю.	106, 147, 152
<b>Б</b>		<b>М</b>		Слепнев А.В.	131
Бахшиев А.В.	26, 30, 54	Мазанова А.Е.	178	Смирнов К.С.	106, 152
Божкова Е.Д.	178	Макаренко Н.	75	Станкевич Л.А.	30, 54
Брелов А.М.	125	Максимова Н.Е.	19	Станкова Е.П.	77
Бронфельд Г.Б.	34	Медведева Т.М.	159	Стратан Н.Ф.	204
Буланов Н.А.	115	Меклер А.А.	77	Сысоев И.В.	38, 48, 72, 156, 159
Буянова А.С.	170	Мухина Е.А.	115	Сысоева М.В.	38, 48, 156, 159
<b>В</b>		<b>Н</b>		<b>Т</b>	
Вечкапова С.О.	121	Никонов Ю.В.	78	Тельных А.А.	45, 85
Виноградова Л.В.	156	Никулина М.В.	81	Терехов С.А.	163
<b>Г</b>		Новиков М.Ю.	144	Титова А.А.	43
Газя Г.В.	204	Нуйдель И.В.	45, 85	Тихомирова Е.А.	138
Галкин В.А.	201	<b>О</b>		Тихомирова Ю.Б.	170
Громов К.Н.	134	Ольшанский В.М.	90	Турубар Д.С.	19
<b>Д</b>		Оселедчик М.Б.	207	Турчин И.В.	85
Демчева А.А.	26	<b>П</b>		<b>У</b>	
Долинина А.Ю.	38	Палагин С.В.	94	Узаков Ш.С.	106
Дорофеев Е.В.	178	Панкрашкина Н.Г.	97, 183	Уколов Р.В.	167
<b>Е</b>		Парин С.Б.	101, 109, 134	<b>Ф</b>	
Егоров Н.М.	159	Парсамян Р.Р.	119, 128	Федотчев А.И.	134
Емельянова Е.П.	41	Пахомов А.М.	103	Филатов М.А.	201
Еремин Е.В.	109, 115, 170	Перевознюк Д.А.	106	Филатова О.Е.	204
Еськов В.В.	204	Перекатова В.В.	85	Филяев М.А.	170
Еськов В.М.	201	Пермяков С.А.	109	Фомин И.С.	174
<b>Ж</b>		Полевая С.А.	109, 115, 134, 178	<b>Х</b>	
Журавлев М.О.	43, 131, 142	Попова М.А.	119	Халак М.Е.	178
<b>З</b>		Пройдакова Е.В.	97	Хилов А.В.	85
Запара Т.А.	125	Проскура А.Л.	121, 125	Хилько А.И.	180
Зимин И.А.	45, 85	<b>Р</b>		Хоботов А.Г.	180
Зленко Д.В.	90	Ратушняк А.С.	121, 125	Хроматов В.Е.	97, 183
<b>К</b>		Руннова А.Е.	41, 128, 131	<b>Ц</b>	
Каганов Ю.Т.	207	Руцкова Е.М.	106	Циркова М.М.	109, 115
Калинина В.И.	180	<b>С</b>		Цукерман В.Д.	186
Капустников А.А.	48, 159	Савчук Л.В.	134		
Киров Д.И.	34	Саматова К.С.	167		
Клочков Б.Н.	51				

<b>Ч</b>		<b>Я</b>		<b>N</b>	
Чеберева О.Н.	190	Якименко Г.К.	174	Nekrich O.Yu.	111
Чура О.О.	45	Яковлев Д.С.	43	<b>О</b>	
<b>Ш</b>		Яхно В.Г.	45, 210	Ossenblock P.	72
Шакирова Л.С.	201	<b>Е</b>		<b>Р</b>	
Шмыров В.А.	77	Esmacili A.	152	Polevaya S.A.	111
Шумский С.А.	193	<b>I</b>		<b>V</b>	
		Iotchev I.	106	Van Luijelaar G.	72

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Александрова Н.Ш.</i> Спонтанное знание. Что мы сейчас о нем знаем? .....	7
<i>Абрашкин А.А.</i> Евразийские потоки и новая парадигма древней истории Евразии.....	9
<i>Алексеев А.К.</i> О диапазоне применимости теории Фишера .....	11
<i>Аверкина Л.А., Лахгайн Б.</i> Адаптация языка к социальным изменениям в обществе: культурные параллели Россия – Германия .....	15
<i>Александров И.О., Максимова Н.Е., Турубар Д.С.</i> Координация актуализации составляющих психологических структур .....	19
<i>Антонец В.А.</i> Постулаты теории мышления и их следствия. Часть 2: Когнитивная модель мышления.....	23
<i>Бахшиев А.В., Демчева А.А.</i> Сегментная спайковая модель нейрона (CSNM) .....	26
<i>Бахшиев А.В., Корсаков А.М., Астапова Л.А., Станкевич Л.А.</i> Структурная адаптация сегментной спайковой модели нейрона .....	30
<i>Бронфельд Г.Б., Киров Д.И.</i> Варианты решения проблемы понимания на основе технологии прямого наложения знаний .....	34
<i>Долинина А.Ю., Сысоев И.В., Сысоева М.В.</i> Метод автоматического детектирования перезапусков в пик-волновых разрядах большой длительности у крыс с абсансной эпилепсией .....	38
<i>Емельянова Е.П., Руннова А.Е.</i> Автоматический анализ выраженности индивидуальных особенностей в многоканальных сигналах ЭЭГ на базе рекуррентного анализа .....	41
<i>Журавлев М.О., Титова А.А., Яковлев Д.С.</i> Устойчивые характеристики колебательной структуры ЭЭГ-активности во время ночного сна у пациентов с нарушениями памяти .....	43
<i>Зимин И.А., Лебедев А.А., Нуйдель И.В., Тельных А.А., Чура О.О., Яхно В.Г.</i> Нейроноподобная фильтрация для выделения особых точек на изображениях крыльев пчел .....	45
<i>Капустников А.А., Сысоева М.В., Сысоев И.В.</i> Переходные процессы в сетях осцилляторов Фитц-Хью – Нагумо как модель пик-волновых разрядов при абсансной эпилепсии.....	48
<i>Клочков Б.Н.</i> Моделирование динамики кровеносных сосудов .....	51
<i>Корсаков А.М., Астапова Л.А., Бахшиев А.В., Станкевич Л.А.</i> Формирование условного рефлекса на сегментной спайковой модели нейрона при моделировании поведенческих функций .....	54
<i>Крылов А.К.</i> Сопоставление оценок сложности нейронной активности фактором Фано и методом DFA .....	58
<i>Крылов А.К.</i> Оценка сложности нейронной активности методом условной энтропии ее символической динамики .....	60
<i>Крылов А.К.</i> Порождение конфликтности мнений в социуме алгоритмами социальных сетей интернета.....	63
<i>Кузенков О.А.</i> Идентификация функции приспособленности, зависящей от множества конкурирующих стратегий.....	65
<i>Кузнецов А.А.</i> К вопросу о механизме шизофрении .....	69
<i>Лачинова Д.А., van Luijteleaer G., Ossensblock P., Сысоев И.В.</i> Определение индивидуальных особенностей пик-волновых разрядов с помощью реализации алгоритма расчёта взаимной информации по сигналам магнитоэнцефалограмм .....	72
<i>Макаренко Н.</i> Графы, сети, лапласианы, кривизна Риччи и все такое.....	75



<i>Меклер А.А., Станкова Е.П., Шмыров В.А.</i> Особенности динамики мозговых процессов при выполнении когнитивных заданий различной сложности.....	77
<i>Никонов Ю.В.</i> Этанол-зависимая функциональная система со свойствами дискретного временного квазикристалла .....	78
<i>Никулина М.В., Антонец В.А.</i> Опыт анализа сглаженных кардиоинтервалограмм при стрессе.....	81
<i>Нуйдель И.В., Перекатова В.В., Тельных А.А., Хилов А.В., Зимин И.А., Турчин И.В.</i> Автоматическая сегментация опухоли по оптоакустическим ангиографическим изображениям на основе сверточной нейронной сети U-net.....	85
<i>Ольшанский В.М., Зленко Д.В.</i> Формирование образов электрического поля и попытка преодолеть внутривидовой барьер.....	90
<i>Палагин С.В.</i> Осознание природы когнитивных моделей постнеклассической научной рациональности – первое условие овладения ноосферным мышлением.....	94
<i>Панкрашкина Н.Г., Пройдакова Е.В., Хроматов В.Е.</i> Стробирующие моменты жизни с точки зрения учёного-вероятностника. К 80-летию М.А. Федоткина.....	97
<i>Парин С.Б.</i> Стресс. И не только об эндорфинах .....	101
<i>Пахомов А.М.</i> Программный инструментарий разметки данных для обучения алгоритмов классификации событий на изображениях кальциевого имиджинга.....	103
<i>Перевознюк Д.А., Iotchev I., Узаков Ш.С., Руцкова Е.М., Смирнов К.С., Ситникова Е.Ю.</i> Пик-волновая активность подавляет гиппокампальные ripples у крыс WAG/Rij.....	106
<i>Пермяков С.А., Полевая С.А., Циркова М.М., Еремин Е.В., Парин С.Б.</i> Эндогенные аномалии кардиоритма у пациентов с COVID-19 .....	109
<i>Polevaya S.A., Nekrich O.Yu.</i> An experimental model for evaluating the effectiveness of the biofeedback method for optimizing the functional state in the problem of school maladjustment .....	111
<i>Полевая С.А., Циркова М.М., Мухина Е.А., Еремин Е.В., Буланов Н.А.</i> Цифровое отображение особенностей когнитивных процессов у пациентов в клинической фазе COVID-19.....	115
<i>Попова М.А., Сельский А.О., Парсамян Р.Р.</i> Объективные характеристики когнитивных ВП и их использование в задачах поиска классификации и поиска маркеров у пациентов с различными типами головной боли.....	119
<i>Проскура А.Л., Вечкапова С.О., Ратушняк А.С.</i> Вклад периферических гормонов в функционирование когнитивной системы.....	121
<i>Ратушняк А.С., Запара Т.А., Проскура А.Л., Брелов А.М.</i> Моделирование и анализ функциональных свойств базовых агентов когнитивных систем .....	125
<i>Руннова А.Е., Парсамян Р.Р.</i> Нейропсихологические корреляты внимания человека на ЭЭГ в монотонной активности: устойчивость при хронических болевых синдромах и возрастных изменениях .....	128
<i>Руннова А.Е., Журавлев М.О., Семенова Н.И., Слепнев А.В., Сергеев К.С., Семячкина-Глушковская О.В.</i> Изменение в структуре ЭКоГ крыс Wistar после звукового воздействия.....	131
<i>Савчук Л.В., Полевая С.А., Громов К.Н., Федотчев А.И., Парин С.Б.</i> Отображение школьной дезадаптации в вариабельности ритма сердца .....	134
<i>Селезнева Е.И., Тихомирова Е.А.</i> Влияние индуцированной когнитивной нагрузки на эффективность оценки достоверности сообщаемой информации.....	138
<i>Сельский А.О., Журавлёв М.О.</i> Исследование когнитивных вызванных потенциалов в процессе длительной когнитивной нагрузки.....	142
<i>Симонян М.С., Новиков М.Ю.</i> Изменение пространственной структуры активности головного мозга при длительной монотонной зрительной нагрузке .....	144
<i>Ситникова Е.Ю.</i> Процессы торможения в нейронных сетях и контроль эпилепсии .....	147
<i>Смирнов К.С., Esmaeili A., Ситникова Е.Ю.</i> Автоматическая установка «ИнтелиКейдж» для исследования поведения лабораторных крыс.....	152

<i>Сысоев И.В., Корнилов М.В., Сысоева М.В., Виноградова Л.В.</i> Математическое моделирование инициации и распространения лимбической эпилептической активности в гиппокампе .....	156
<i>Сысоева М.В., Медведева Т.М., Егоров Н.М., Капустников А.А., Сысоев И.В.</i> Моделирование эпилептиформной активности .....	159
<i>Терехов С.А.</i> Гуманитарный искусственный интеллект .....	163
<i>Уколов Р.В., Саматова К.С., Симонян М.С.</i> Динамика распределений суточных микропробуждений у крыс линии WAG/Rij, генетически предрасположенных к абсансной эпилепсии: автоматический анализ ЭКоГ .....	167
<i>Филяев М.А., Буянова А.С., Тихомирова Ю.Б., Еремин Е.В., Ашина Н.П.</i> Психофизиологическая оценка эффективности психологического консультирования по методике PSY2.0 для коррекции проявлений аллергии разной этиологии .....	170
<i>Фомин И.С., Якименко Г.К.</i> Классификация объектов в помещениях сверточными сетями на встраиваемом вычислителе .....	174
<i>Халак М.Е., Мазанова А.Е., Дорофеев Е.В., Семенова Л.Э., Божкова Е.Д., Полевая С.А.</i> Когнитивный дефицит переболевших COVID-19: обзор литературы .....	178
<i>Хоботов А.Г., Калинина В.И., Хилько А.И.</i> Исследование применения нейроподобных функций для обработки локационных сигналов .....	180
<i>Хроматов В.Е., Панкрашкина Н.Г., Семенова Т.Е.</i> Математические загадки и когнитивный подход к проблемам преподавания дисциплин физико-математического цикла для инженерных специальностей вузов .....	183
<i>Цукерман В.Д.</i> К творческому познанию: креативные начала реляционных нейронных сетей с четным циклическим торможением .....	186
<i>Чеберева О.Н.</i> Художественный критерий в архитектурном формообразовании и постулярный баланс .....	190
<i>Шумский С.А.</i> ADAM – модель искусственной психики .....	193
<i>Еськов В.М., Галкин В.А., Шакирова Л.С., Филатов М.А.</i> Системный принцип в когнитивных исследованиях .....	201
<i>Еськов В.В., Филатова О.Е., Газя Г.В., Стратан Н.Ф.</i> Новые инварианты и новые методы системного синтеза в когнитивных науках .....	204
<i>Каганов Ю.Т., Оселедчик М.Б.</i> Сложные системы и происхождение когнитивной способности человеческого интеллекта .....	207
<i>Яхно В.Г.</i> Смысловые модели когнитивных операций .....	210
<i>Авторский указатель</i> .....	214

*Научное издание*

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА  
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2021**

*ТРУДЫ VII ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ*

Редакторы *И.А. Кокорина, Н.Н. Кралина*  
Технический редактор *Д.П. Семенова*  
Компьютерная верстка *М.В. Башевой, Е.И. Казаровой, Н.Н. Кралиной*  
Обложка *С.В. Кротовой*

Подписано в печать 30.08.2021. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Усл. печ. л. 27,5. Уч.-изд. л. 25,7.  
Тираж 120 экз. Заказ № 36(2021)

Федеральный исследовательский центр  
Институт прикладной физики Российской академии наук  
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Отпечатано на ризографе в типографии ФИЦ Институт прикладной физики РАН

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**