

ISSN 2077-8333 (print)
ISSN 2311-4088 (online)

ЭПИЛЕПСИЯ и пароксизмальные состояния



2024 Том 16 №1

EPILEPSY AND PAROXYSMAL CONDITIONS

2024 Vol. 16 №1

<https://epilepsia.su>

Данная интернет-версия статьи была скачана с сайта <http://www.epilepsia.su>. Не предназначено для использования в коммерческих целях.
Информацию о репринтах можно получить в редакции. Тел.: +7 (495) 649-54-95; эл. почта: info@irbis-1.ru.

<https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2024.178>

ISSN 2077-8333 (print)

ISSN 2311-4088 (online)

Применение искусственного интеллекта в диагностике абсансной эпилепсии с одновременным тестированием уровня сознания пациента в период иктального события

М.Б. Миронов¹, М.О. Абрамов², В.В. Кондратенко³, И.Р. Вафин³,
С.Ю. Смирнов³, С.Е. Ваганов³, А.А. Иванов³

¹ Медицинский центр неврологии и клинической нейрофизиологии (Леонтьевский пер., д. 2А, стр. 1, Москва 125009, Россия)

² Общество с ограниченной ответственностью «Институт детской и взрослой неврологии и эпилепсии им. Святителя Луки» (ул. Академика Анохина, д. 9, Москва 119571, Россия)

³ Общество с ограниченной ответственностью «Нейрософт» (ул. Воронина, д. 5, Иваново 153032, Россия)

Для контактов: Алексей Алексеевич Иванов, e-mail: iva@neurosoft.com

РЕЗЮМЕ

Актуальность. С учетом сложностей в выявлении абсансов и оценке уровня сознания у пациентов с эпилепсией крайне актуальной становится разработка цифровых программ с целью автоматической регистрации и тестирования данного типа эпилептических приступов и их электроэнцефалографических (ЭЭГ) паттернов, в т.ч. на основе искусственного интеллекта.

Цель: разработка алгоритма автоматического выявления абсансных приступов для тестирования уровня сознания пациента в режиме реального времени при проведении длительного видео-ЭЭГ-мониторинга.

Материал и методы. Работа по созданию алгоритма проводилась совместно врачами и инженерами. Врачами подготовлен набор размеченных ЭЭГ-записей больных с подтвержденным диагнозом абсансной эпилепсии. В сформированной базе обследований двумя независимыми экспертами размечены типовые эпизоды абсансных приступов. Далее на этой основе сформирована обучающая и тестовая выборки для обучения и тестирования нейросетевого алгоритма. Обученная нейронная сеть внедрена в программное обеспечение «Нейрон-Спектр.NET», проведено сравнение точности срабатывания полученного нейросетевого алгоритма с данными, приведенными в аналогичных работах других авторов.

Результаты. При использовании размеченной базы разработан и обучен нейросетевой алгоритм для обнаружения абсансной эпиактивности на ЭЭГ. Сравнительный анализ эффективности реализованного метода с другими подходами показал, что предложенный алгоритм сопоставим с последними по качеству, а по некоторым параметрам превосходит их. Оценку точности осуществляли по общедоступной базе с размеченными эпизодами эпиактивности.

Закключение. Предложена программно-аппаратная система автоматизированной оценки уровня сознания пациента в период абсансного приступа во время проведения продолженного видео-ЭЭГ-мониторинга. В будущем возможно использование нейронных сетей не только для определения уровня сознания больного, но и для купирования возникающего приступа посредством стимуляции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Абсансная эпилепсия, электроэнцефалография, ЭЭГ, видео-ЭЭГ-мониторинг, искусственный интеллект, нейронные сети, глубокое обучение.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

Поступила: 30.11.2023. В доработанном виде: 05.02.2024. Принята к печати: 29.02.2024. Опубликовано: 30.03.2024.

Конфликт интересов

Авторы В.В. Кондратенко, И.Р. Вафин, С.Ю. Смирнов, С.Е. Ваганов, А.А. Иванов являются штатными сотрудниками компании «Нейрософт» – российского производителя ЭЭГ-оборудования.

Вклад авторов

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Для цитирования

Миронов М.Б., Абрамов М.О., Кондратенко В.В., Вафин И.Р., Смирнов С.Ю., Ваганов С.Е., Иванов А.А. Применение искусственного интеллекта в диагностике абсансной эпилепсии с одновременным тестированием уровня сознания пациента в период иктального события. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2024; 16 (1): 8–17. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2024.178>.

Artificial intelligence applied for the diagnosis of absence epilepsy with simultaneously tested patient's consciousness level in ictal event

M.B. Mironov¹, M.O. Abramov², V.V. Kondratenko³, I.R. Vafin³, S.Yu. Smirnov³, S.E. Vaganov³, A.A. Ivanov³

¹ Medical Center of Neurology and Clinical Neurophysiology (2A bldg 1 Leontyevsky Passage, Moscow 125009, Russia)

² St. Luke's Institute of Pediatric and Adult Neurology and Epilepsy (9 Academician Anokhin Str., Moscow 119571, Russia)

³ Neurosoft LLC (5 Voronin Str., Ivanovo 153032, Russia)

Corresponding author: Alexey A. Ivanov, e-mail: iva@neurosoft.com

SUMMARY

Background. Given the difficulties in identifying absences and assessing the level of consciousness in epilepsy patients, it is extremely relevant to develop digital programs for automatic registration and testing of this type of epileptic seizures and related electroencephalographic (EEG) patterns, including those based on artificial intelligence.

Objective: development of an algorithm for automatic detection of absence seizures to test real time patient's consciousness level during long-term video-EEG monitoring.

Material and methods. The work on creating an algorithm was carried out during joint doctor/engineer cooperation. Doctors prepared a set of labeled EEG recordings of patients with verified absence epilepsy. Two independent experts in the generated examinations database mapped typical episodes of absence seizures that allowed to develop training and testing samples for a neural network algorithm to detect EEG absence epiactivity. Next, trained neural network was incorporated into Neuron-Spectrum.NET software to compare its accuracy with similar approaches published elsewhere.

Results. A neural network algorithm was developed and trained using a mapped database to detect EEG absence epiactivity. A comparative analysis of the effectiveness for the proposed method vs. other approaches showed that the former is comparable in quality, whereas in some aspects – even superior to the latter. Accuracy was assessed using a publicly available database with mapped epiactivity episodes.

Conclusion. A hardware and software system for automated assessment of patient's consciousness level during absence seizure in continuous video-EEG monitoring was proposed. Potentially, neural networks may be applied not only to assess patient's consciousness level, but also to stop stimulation-mediated seizure onset in the future.

KEYWORDS

Absence seizure, absence epilepsy, electroencephalography, EEG, video-EEG monitoring, artificial intelligence, neural networks, deep learning.

ARTICLE INFORMATION

Received: 30.11.2023. **Revision received:** 05.02.2024. **Accepted:** 29.02.2024. **Published:** 30.03.2024.

Conflict of interests

The authors V.V. Kondratenko, I.R. Vafin, S.Yu. Smirnov, S.E. Vaganov, and Ivanov A.A. are employees of the Neurosoft company – a Russian manufacturer of EEG equipment.

Authors' contribution

All authors contributed equally to this article.

For citation

Mironov M.B., Abramov M.O., Kondratenko V.V., Vafin I.R., Smirnov S.Yu., Vaganov S.E., Ivanov A.A. Artificial intelligence applied for the diagnosis of absence epilepsy with simultaneously tested patient's consciousness level in ictal event. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2024; 16 (1): 8–17 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2024.178>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

Типичные абсансы (ТА) – короткие генерализованные эпилептические приступы, характеризующиеся внезапным изменением уровня сознания, замиранием. Согласно дефиниции абсансы состоят из двух основных компонентов: нарушение сознания, синхронно сопровождающееся электроэнцефалографическими (ЭЭГ) изменениями в виде генерализованных разрядов комплексов «острая – медленная волна» частотой 3 Гц и более [1] (рис. 1).

Для ТА характерно внезапное начало и такое же внезапное завершение. Пациент мгновенно застывает, взгляд устремляется в одну точку. Наблюдается прерывание начатой деятельности [2]. На обращенную к нему речь и жестовые манипуляции больной не реагирует. Постуральный тонус не меняется, и при данном типе приступов падений пациента не отмечается [3]. Констатируется потеря сознания с амнезией на этот период. Уровень нарушения сознания во время приступа может флуктуировать от полного выключения до частичного сохранения памяти на события приступного периода. Постприступная спутанность сознания или сонливость не характерны, и пациенты быстро восстанавливают возможность продолжать прерванную деятельность. Длительность ТА, как правило, составляет не более 10–30 с.

Нарушение сознания может быть единственным клиническим признаком, но часто сочетается с другими симптомами. В связи с этим выделяют простые и сложные ТА. Простые абсансы характеризуются замиранием, прекращением всякой деятельности пациента, фиксированным взглядом. В структуре сложных абсансов отмечается присоединение минимального моторного компо-

нента – миоклонического, атонического, вегетативного, также возможны автоматизмы и иные проявления [2].

ТА входят в структуру трех эпилептических синдромов в рамках идиопатической генерализованной эпилепсии (ИГЭ): детская абсансная эпилепсия (ДАЭ), юношеская абсансная эпилепсия (ЮАЭ), юношеская миоклоническая эпилепсия (ЮМЭ) [4, 5]. Клинические проявления ТА схожи, но при этом имеются клинко-электроэнцефалографические отличительные особенности указанного типа приступов при данных синдромах. Так, возраст дебюта при ДАЭ составляет 4–10 лет (возможен диапазон от 2 до 13 лет), при ЮМЭ – 9–13 лет (с диапазоном от 8 до 20 лет). Также отличается частота возникновения абсансов: для ДАЭ характерны частые, ежедневные приступы [6], при ЮАЭ и ЮМЭ типичные абсансы возникают реже. Продолжительность ТА при ДАЭ составляет 3–20 с [7], при ЮАЭ – 2–30 с, при ЮМЭ наблюдаются короткие приступы – 3–8 с. Для абсансов при ДАЭ характерно полное выключение сознания, тогда как при ЮАЭ и ЮМЭ возможна флуктуация сознания.

ЭЭГ-паттерн ТА имеет крайне схожую морфологическую структуру, а именно появление ритмичных регулярных высокоамплитудных генерализованных билатерально-синхронных разрядов комплексов «острая – медленная волна» [4] (рис. 2). При этом в период возникновения ТА могут отличаться частотные характеристики приступных разрядов в рамках разных синдромов ИГЭ. Так, для абсансов при ДАЭ частотный диапазон иктивных генерализованных разрядов в первые секунды составляет от 2,5 до 4 Гц [8], при ЮАЭ и ЮМЭ билатеральные пик-волновые разряды имеют частоты от 3 до 5,5 Гц [2].

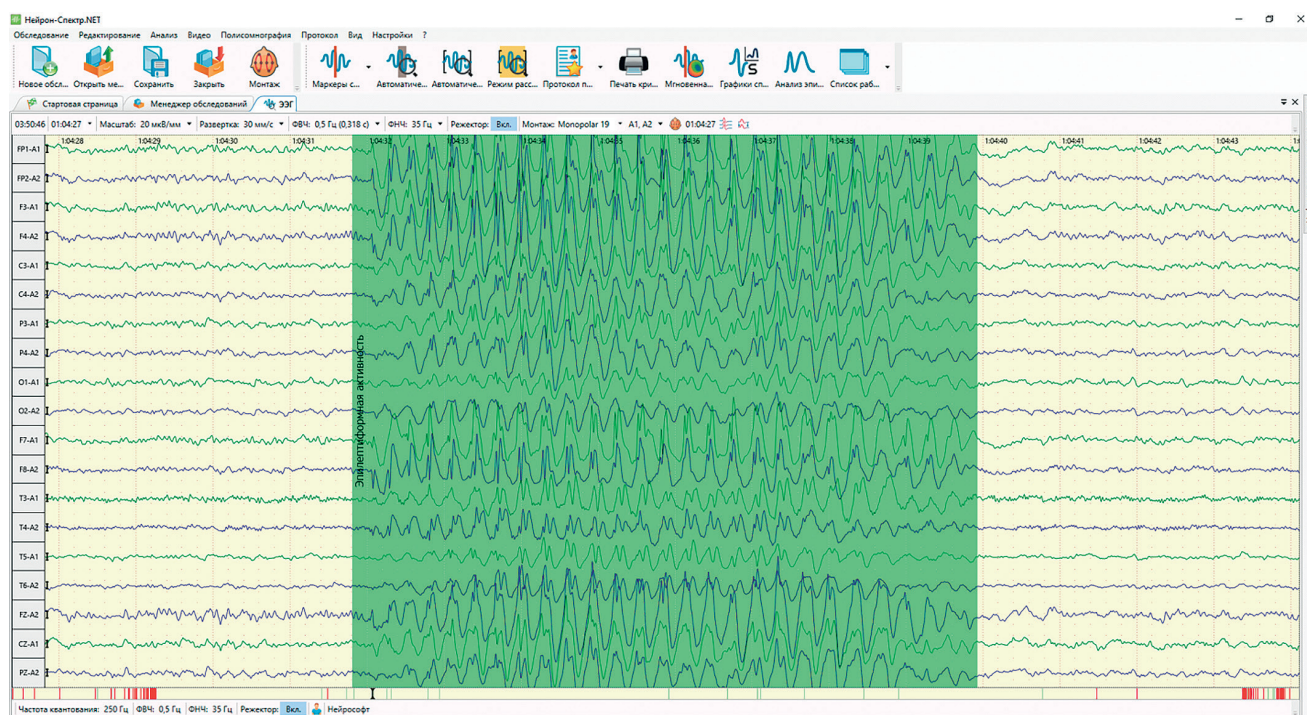


Рисунок 1. Пример регистрации типичного абсанса на электроэнцефалографической записи

Figure 1. Representative electroencephalography absence seizure recording

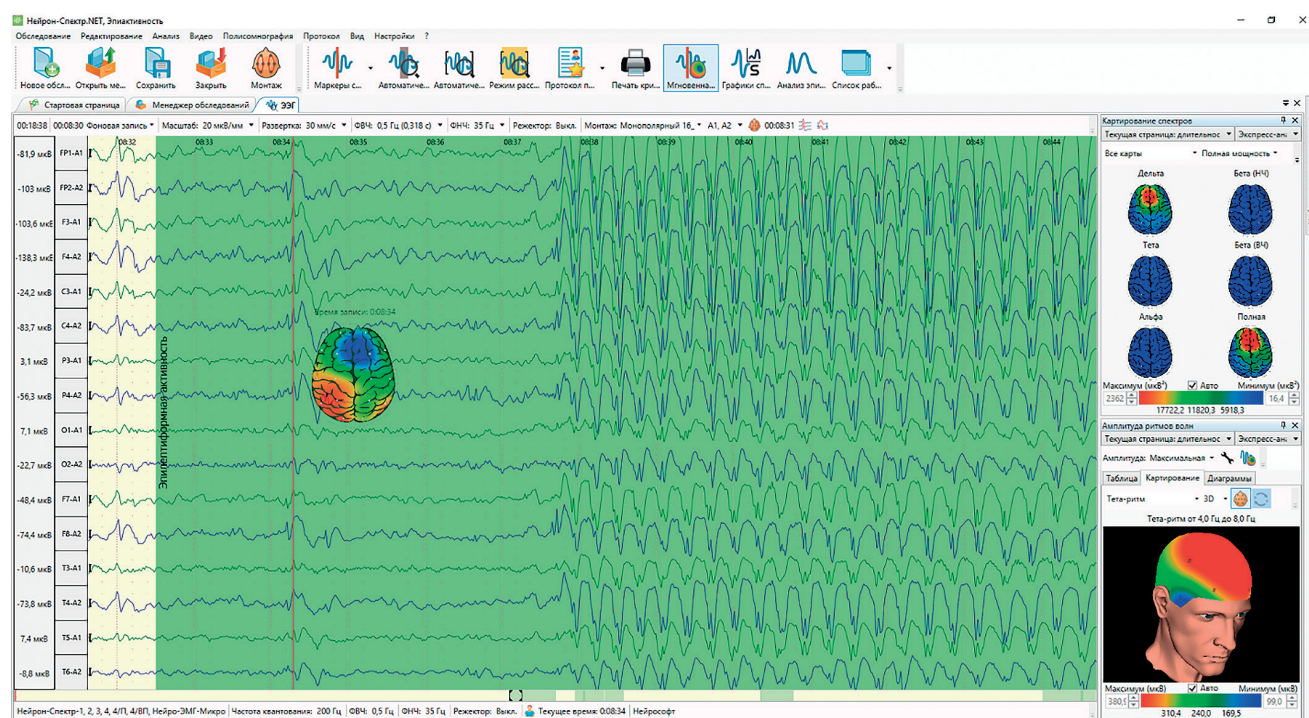


Рисунок 2. Пример абсансного приступа на электроэнцефалографической записи с элементами математического анализа в виде топографического картирования источника спайковой активности. В ходе электроэнцефалографической записи зарегистрирован типичный абсанс, сопровождавшийся появлением ритмичного регулярного высокоамплитудного генерализованного билатерально-синхронного разряда комплексов «острая – медленная волна» частотой 3,5 Гц

Figure 2. Representative electroencephalography absence seizure recording with elements of mathematical analysis based on topographically mapped spike activity source. A typical electroencephalography absence seizure was recorded accompanied by appearance of a rhythmic, regular, high-amplitude generalized bilateral synchronous 3.5 Hz sharp-slow wave discharge

Также ТА могут встречаться и при генетических генерализованных эпилепсиях [9]. В частности, при эпилепсии с эпилептическим миоклонусом век, а также при эпилепсии с миоклоническими абсансами в период приступов регистрируется ритмичная регулярная генерализованная пик-волновая активность частотой 3 Гц [5], которую можно локализовать с помощью методов математической обработки ЭЭГ-сигнала (рис. 3).

Для диагностики ТА принципиально важно выявление факта изменения уровня сознания в момент приступа. В настоящее время на практике во время проведения продолженного видео-ЭЭГ-мониторинга в выявлении ТА и определении уровня сознания пациента в период приступа могут возникать сложности. Например, в случае коротких абсансных приступов факт выключения сознания достаточно трудно определить ввиду их кратковременности (не более 2–5 с), и внешне данные пароксизмы могут практически не отличаться от повседневной двигательной активности пациента. Клинически абсансы, возникающие в период коротких генерализованных билатерально-синхронных разрядов комплексов «пик, полипик – волна» на ЭЭГ, могут проявляться незначительными запинками в речи, едва заметным миоклоническим компонентом в виде подергивания бровей, ресниц с заведением глазных яблок вверх. При этом выявление изменения уровня сознания (основного критерия абсансного приступа) возможно, как правило, лишь при длительном непрерывном разговоре, чтении или счете.

Отдельно рассматривают так называемые фантомные абсансы – приступы, протекающие незаметно для пациента и/или для окружающих. Характерна флуктуация уровня сознания в иктальный период. Выключение сознания и замирание при этом может выявляться в первые несколько секунд от начала приступа. Далее, как правило, больной может выполнять простые инструкции на фоне продолжающегося разряда генерализованной пик-волновой активности на ЭЭГ. Клинически в период приступа пациент может приостановить начатую деятельность, возможна незначительная гипомимия лицевой мускулатуры с миоклоническим компонентом или без него в периорбитальной мускулатуре, в момент разговора могут отмечаться запинки, повторение отдельных слов, прекращение речи.

Для оценки уровня сознания пациента в период иктального события в условиях видео-ЭЭГ-лаборатории обычно техник, проводящий обследование, выполняет тестирование больного, задавая ему вопросы и/или давая простые команды. Работа техников по оценке уровня сознания осложнена тем, что продолжительность абсансов скоротечна, а клинические проявления порой незначительны. Поэтому в условиях лаборатории видео-ЭЭГ-мониторинга в диагностике абсансов возможны ошибки в тестировании со стороны персонала. К наиболее частым можно отнести:

– тестирование пациента уже после иктального разряда;

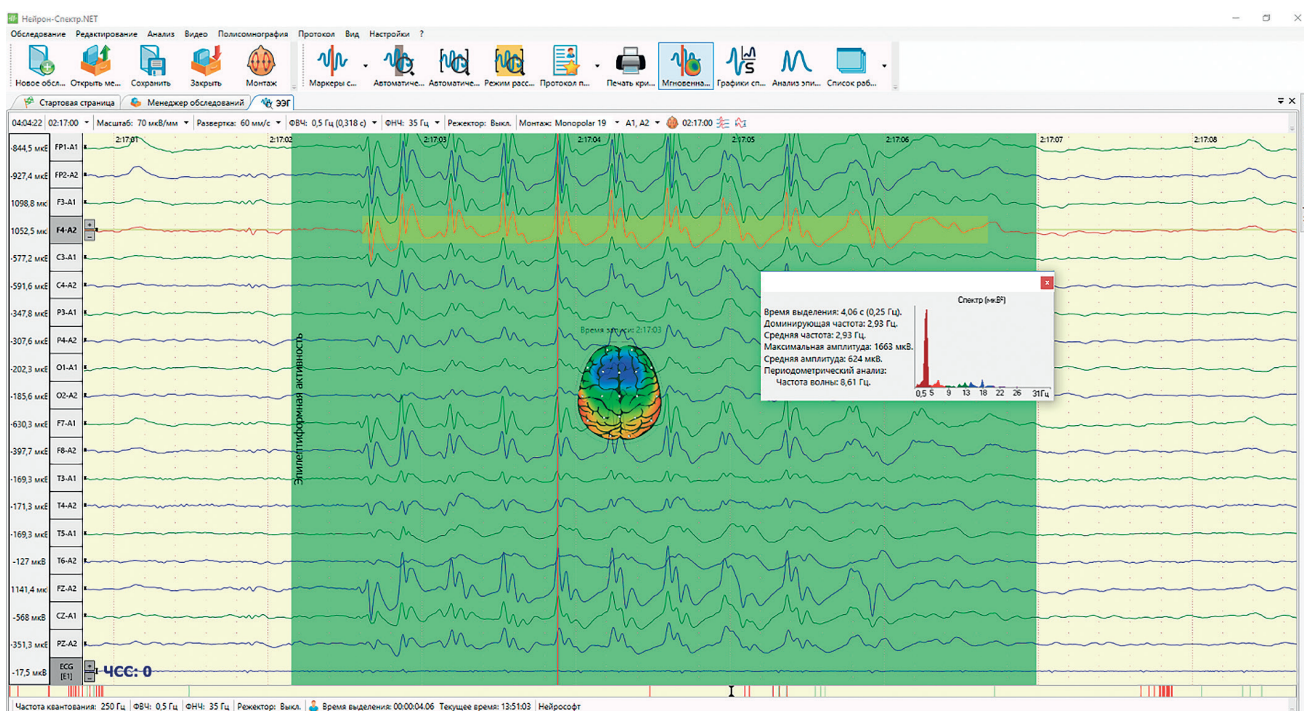


Рисунок 3. Применение математической обработки при визуальном анализе абсансного приступа позволяет рассчитать среднюю частоту, амплитуду и локализацию зафиксированной эпилептиформной активности

Figure 3. Mathematical processing in visually analyzed absence seizure allows to calculate mean frequency, amplitude and localization for recorded epileptiform activity

- полное отсутствие тестирования;
- невнятно предложенные задания.

С учетом сложностей в выявлении абсансов и оценке уровня сознания у пациентов с эпилепсией крайне актуальна разработка цифровых программ с целью автоматической регистрации и тестирования данного типа эпилептических приступов и их ЭЭГ-паттернов, в т.ч. на основе искусственного интеллекта.

Цель – разработка алгоритма автоматического выявления абсансных приступов для тестирования уровня сознания пациента в режиме реального времени при проведении длительного видео-ЭЭГ-мониторинга.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ / MATERIAL AND METHODS

Разрабатываемый алгоритм должен обладать достаточной точностью, скоростью работы и малой временной задержкой обнаружения момента начала эпизода абсансной эпилептической активности.

Алгоритм работы системы проверки уровня сознания пациента может быть представлен в виде блок-схемы (рис. 4). В качестве рабочей площадки для реализации этого алгоритма была выбрана программа «Нейрон-Спектр.NET»¹. В данном программном обеспечении уже реализован алгоритм детектирования эпилептиформной активности, основанный на принципе спектрального анализа [10]. Однако использовать

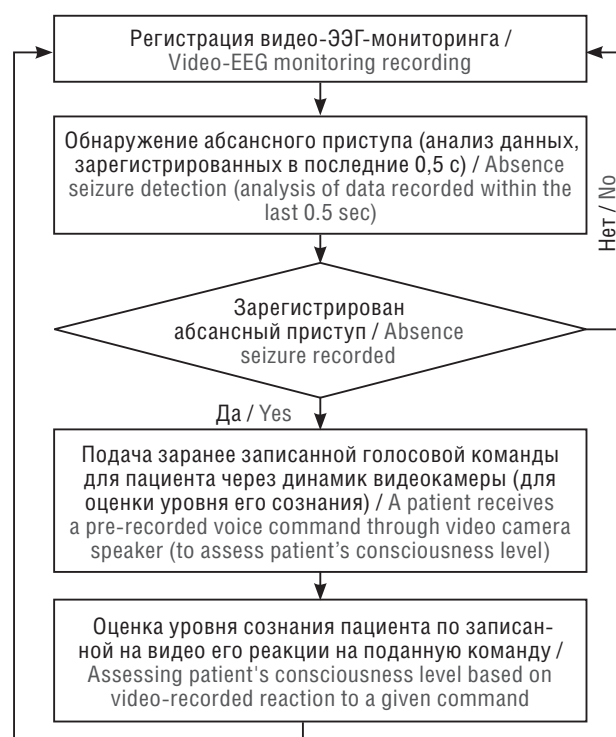


Рисунок 4. Схема работы алгоритма детектирования абсансного приступа и проверки уровня сознания пациента во время проведения продолженного электроэнцефалографического (ЭЭГ) видеомониторинга

Figure 4. An algorithm workflow for detection of absence seizure and assessment of patient's consciousness level in continuous video-electroencephalography (video-EEG) monitoring

¹ Реестровая запись № 10368 от 21 апреля 2021 г. в Реестре программного обеспечения Российской Федерации.

его для своевременной выдачи голосовой команды пациенту в момент начала абсанса оказалось невозможно, т.к. алгоритму требуется как минимум несколько секунд записи для определения наличия эпилептической активности, а абсансный приступ, как отмечалось выше, скоротечен.

Классические алгоритмы онлайн-детектирования эпилептиформной активности [10–13] не обладают достаточной точностью или скоростью реакции для оценки уровня сознания пациента в реальном времени, а предложенные ранее нейросетевые методы [14, 15] затруднительно использовать в реальном времени на центральном обрабатывающем устройстве (англ. central processing unit, CPU) ввиду их высокой вычислительной сложности. Поэтому командой разработчиков было принято решение в качестве основы детектора использовать искусственную нейронную сеть.

Требования к новому алгоритму обнаружения абсансного приступа / Requirements for a new algorithm of absence seizure detecting

Исходя из специфики поставленной задачи, к новому детектору были предъявлены следующие требования:

- высокая чувствительность (должна обеспечивать надежное срабатывание детектора при появлении абсансного приступа);
- малое время задержки – детектор должен определить начало абсансного приступа в первые 1–2 с его возникновения, чтобы своевременно выдать голосовую команду для пациента (именно этому требованию не соответствуют многие алгоритмы детектирования).

Сбор и разметка ЭЭГ-обследований с абсансными приступами для обучения искусственной нейронной сети / Collecting and marking EEG examinations with absence seizures for artificial neural network training

Точность работы нейросетевого детектора напрямую зависит от размера и качества разметки базы ЭЭГ-обследований, которые были использованы для его обучения. Если разметка событий в базе содержит большой процент ошибок, то качественно обучить нейронную сеть не получится. Сбором и разметкой базы занимались двое врачей-эпилептологов из состава команды исследователей. Разметка моментов времени начала и окончания абсансных приступов проводилась обоими специалистами независимо. Инженерами была выполнена дополнительная проверка разметки. В обучении использовались типовые эпизоды, в которых мнение экспертов совпало.

В базу ЭЭГ-обследований вошли обезличенные данные 15 пациентов с подтвержденным диагнозом абсансной эпилепсии. В общей сложности было размечено 58 ч 19-канальных записей ЭЭГ с монополярным монтажом (всего 313 эпизодов абсансных приступов), зарегистрированных в соответствии с международной системой «10–20%» [16, 17].

Сформированной базы оказалось недостаточно для качественного обучения нейронной сети. Поэтому ее

размер был увеличен искусственным путем с помощью следующих приемов:

- смешивание фоновых записей и фрагментов с типовыми эпизодами абсансных приступов (в качестве фоновых записей использовали ЭЭГ-сигналы, полученные у здоровых пациентов, совокупная длительность фоновых записей составила 678 ч, из которых 362 ч применяли для обучения и 316 ч – для тестирования нейронной сети);

- незначительные искажения сигнала, такие как растяжение и сжатие по оси времени, добавление шума.

Для разработки алгоритма использовали три набора данных: обучающая, валидационная и тестовая выборки. Обучающую выборку применяли для подбора параметров нейронной сети, валидационную – для контроля переобучения (сеть считается переобученной, если она не способна корректно работать на данных, которые не использовались в процессе обучения). Тестовая выборка нужна была для оценки точности обученной нейронной сети. Формирование валидационной и тестовой выборок осуществляли с помощью данных обследований, которые не входили в обучающую выборку.

В результате синтезирования эпизодов было сформировано 500 тыс. элементов обучающей выборки. Элементом обучающей выборки является пара (V, P), где V – фрагмент одноканального сигнала длительностью 6 с при частоте 250 Гц, а P – вероятность события эпилептической активности в последние 2 с рассматриваемого временного отрезка. Значение P принимали равным 1, если длительность эпизода эпилептической активности в последние 2 с фрагмента превышала 1 с. В противном случае P = 0. Набор элементов данного вида составил базу для обучения нейронной сети.

Аналогичным образом была сформирована валидационная выборка, состоящая из 10 тыс. элементов.

Оценку качества разработанного детектора проводили на записях общедоступной базы ЭЭГ-обследований [18, 19], где присутствовали размеченные абсансные приступы. Тестовая база включала 20 записей общей длительностью около 6,5 ч и содержала 99 эпизодов абсансных приступов.

Этические аспекты / Ethical aspects

Так как в данной работе использовались ЭЭГ-обследования пациентов с подтвержденным диагнозом эпилепсии, все данные были обезличены на этапе отбора до включения в обработку. В ходе исследования использовались только ЭЭГ-сигналы без их привязки к персональным данным. Также для тестирования точности работы нейросетевого алгоритма применялись данные из общедоступных баз ЭЭГ-обследований здоровых лиц и пациентов с подтвержденным диагнозом эпилепсии. Следует отметить, что в настоящее время ведутся активные дискуссии о правомерности использования обезличенных медицинских данных без обозначенного в явной форме согласия пациентов для тренировки больших языковых моделей и искусственного интеллекта, однако консенсус в этом вопросе пока не достигнут. Тем не менее сбор и структурирование больших массивов обезличенных

медицинских данных открывает новые возможности в создании передовых методов диагностики и лечения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ / RESULTS AND DISCUSSION

В результате работы группы авторов был разработан нейросетевой алгоритм детекции абсансных приступов и автоматизированной оценки уровня сознания пациента во время иктального события.

Описание алгоритма / Algorithm description

Разработанный алгоритм можно представить в виде схемы (рис. 5).

Формирование фрагмента сигнала

На вход алгоритма приходит порция данных, представляющая собой фрагмент многоканального сигнала

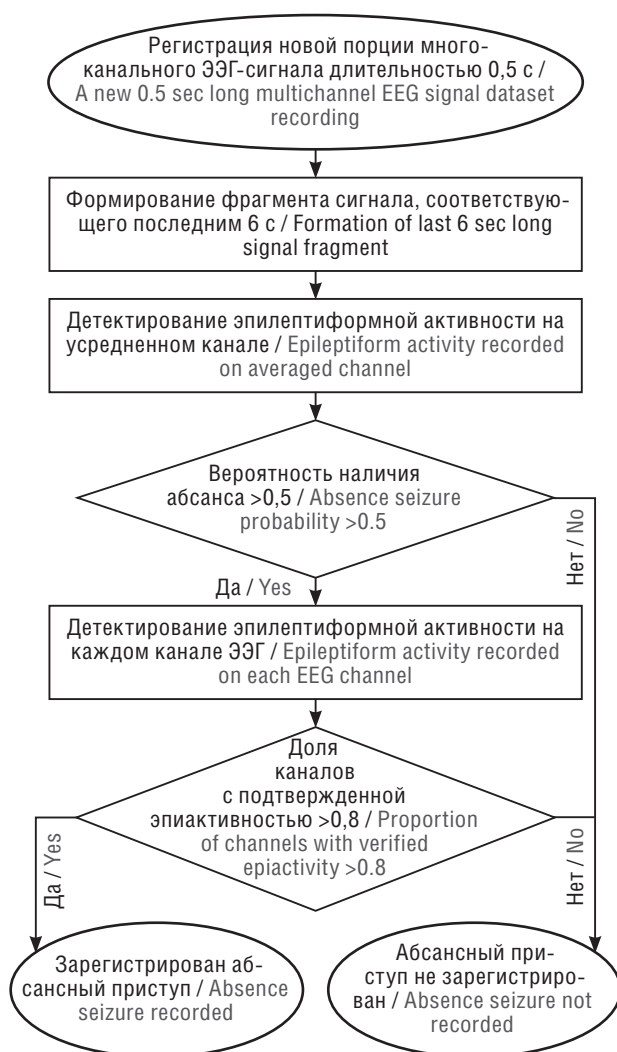


Рисунок 5. Схема разработанного алгоритма детектирования абсансного приступа. ЭЭГ – электроэнцефалография

Figure 5. A workflow for the proposed absence seizure detection algorithm.
EEG – electroencephalography

ла ЭЭГ длительностью 0,5 с, с частотой дискретизации 250 Гц. Посредством накопления полученных порций данных формируется фрагмент сигнала, соответствующий последним 6 с регистрации. Таким образом, каждые 0,5 с на анализ отправляется 6-секундный фрагмент.

Детектирование эпилептиформности на усредненном канале

По сформированному фрагменту проводится расчет усредненного по всем каналам сигнала ЭЭГ, для которого выполняется проверка наличия эпилептиформности с помощью нейросетевого бинарного классификатора. Он представляет собой сверточную нейронную сеть с 1500 входами (6 с сигнала частотой 250 Гц) и одним выходом (оценка вероятности события абсансного приступа). Данный этап позволяет выполнить первичную проверку на возможное наличие эпилептиформности. Абсанс считается возможным, если на выходе классификатора было получено значение оценки вероятности приступа выше 0,5. Если вероятность ниже, то данный фрагмент не требует дальнейшего анализа. Это позволяет уменьшить объем вычислений.

Детектирование эпилептиформности на каждом канале ЭЭГ

Для каждого канала ЭЭГ применяется нейросетевой бинарный классификатор, описанный в предыдущем пункте. Событие на канале считается обнаруженным, если на выходе классификатора вероятность наличия абсанса превысила фиксированный порог T_c (по умолчанию 0,8). Если доля каналов с эпилептиформностью превышает порог T_g (по умолчанию 0,8), то считаем, что текущий фрагмент содержит событие абсансного приступа. Порог T_g необходим для проверки активности на генерализованность (наличия активности на всех отведениях ЭЭГ).

Реализация бинарного классификатора / Implementation of binary classifier

Экспериментальным путем была подобрана архитектура нейронной сети для бинарной классификации. Выбор приведенной архитектуры обоснован небольшим числом параметров и рядом численных экспериментов. Использовано небольшое число параметров, поскольку алгоритм обнаружения абсансного приступа должен работать в реальном времени на CPU.

Разработанная нейросетевая модель включает 83 361 параметр. В схожих по задаче работах [14, 15] число параметров моделей существенно (в десятки раз) превышает используемое авторами настоящей работы.

В качестве целевой функции выступала бинарная кросс-энтропия, в качестве метода оптимизации – алгоритм Adam [20] с ранней остановкой и сохранением лучшей модели по качеству на валидационной выборке. В случае неумения ошибки на валидационной выборке на протяжении 7 эпох процесс обучения останавливался. Также для борьбы с переобучением использовался Dropout [21] с прореживанием 30% на 9-м слое (перед полносвязными слоями).

Обучение модели было проведено 100 раз с различными начальными приближениями. Из обученных моде-

лей выбрана лучшая, имеющая наименьшую ошибку на валидационной выборке.

Обученная модель имела точность классификации 99,15% на обучающей выборке и 98,05% на тестовой.

Сравнительный анализ / Comparative analysis

Выполнен анализ точности реализованного алгоритма обнаружения абсансных приступов по сравнению с некоторыми существующими алгоритмами других авторов [11–14] (табл. 1).

Следует отметить, что провести объективное сопоставление алгоритмов затруднительно ввиду отличия наборов записей, по которым проводился расчет точности. Тем не менее сравнительный анализ показывает, что предложенный в настоящей работе метод является сопоставимым по качеству, а по некоторым параметрам превосходит другие подходы.

Среднее время, необходимое для анализа предложенным алгоритмом 1-часовой 19-канальной ЭЭГ-записи (частота дискретизации 250 Гц) на компьютере с процес-

сором 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400 2.60 GHz, составило 11,5 с. При работе в реальном времени при регистрации ЭЭГ на анализ 1 с записи в среднем необходимо около 3,2 мс процессорного времени.

Внедрение в клиническую практику / Implementation into clinical practice

Предложенный метод обнаружения абсансных приступов обладает достаточной точностью и скоростью работы, чтобы использовать его в качестве триггера для воспроизведения заранее записанных голосовых команд пациенту с целью оценки уровня его сознания во время иктального события.

Нейросетевой алгоритм детектора абсансных приступов был интегрирован в программное обеспечение для регистрации и анализа ЭЭГ «Нейрон-Спектр.NET», в котором проведен контроль работы данного алгоритма на тестовой выборке данных. Разработанный алгоритм предполагается использовать в системе оценки уровня сознания пациента, изображенной на рисунке 6. Как

Таблица 1. Оценка качества для различных методов обнаружения абсансных приступов на электроэнцефалограмме (ЭЭГ)

Table 1. Quality assessment for various methods of detecting electroencephalogram (EEG) absence seizures

Метод / Method	Число ЭЭГ-записей, n / Number of EEG-recordings, n	Число эписобытий, n / Number of epileptic events, n	Чувствительность, % / Sensitivity, %	Специфичность, % / Specificity, %	Точность, % / Accuracy, %	FDR
E.B. Petersen (2011) [13]	24	177	99,10	–	–	0,5
K. Giannakaki (2020) [11]	8	123	97,39	95,86	97,32	–
P. Glaba (2021) [12]	34	199	96,60	–	95,00	0,4
L. Li (2023) [14]	1530	8233	92,43	–	–	–
Предложенный / Proposed	14	313	93,72	98,91	98,73	0,9

Примечание. FDR (англ. false discovery rate) – число ложных срабатываний в час.

Note. FDR – false discovery rate.

Рисунок 6. Схема организации видеоэлектроэнцефалографической лаборатории для проведения продолженного видео-ЭЭГ-мониторинга с автоматизированным контролем уровня сознания пациента в период иктального события

Figure 6. A scheme of video-electroencephalographic laboratory set-up for continuous video-EEG monitoring and automated assessment of patient's consciousness level in ictal event



только нейросетевой алгоритм детектирует начало абсансного приступа, программа воспроизводит голосовую команду для пациента через динамик видеокamеры, на которую ведется видеозапись, или на отдельную звуковую колонку в палате больного. Реакция пациента на воспроизведенную команду отслеживается по видеозаписи.

Предложенный алгоритм в настоящее время внедрен в программу «Нейрон-Спектр.NET» и проходит всестороннее тестирование в лаборатории компании «Нейрософт» (Россия). В дальнейших планах группы исследователей стоит задача клинической апробации нейросетевого детектора абсансной эпилепсии с автоматизированной оценкой уровня сознания пациента в период икhtально-го события в составе ЭЭГ-систем «Нейрон-Спектр-1.4» (регистрационное удостоверение № ФСР 2009/04073), «Нейрон-Спектр-5, -5S» (№ ФСР 2008/03363, № ФСР 2008/03364), «Нейрон-Спектр-61, -65» (№ РЗН 2019/8123), «Нейрон-Спектр-СМ» (№ РЗН 2016/4807) с применением ЭЭГ-электродов (№ РЗН 2017/5783) и электродных систем (№ РЗН 2023/20725).

При успешном внедрении в клиническую практику данный алгоритм позволит существенно упростить работу ЭЭГ-техника по оценке уровня сознания пациента во

время абсансного приступа, а также повысить эффективность проводимого видео-ЭЭГ-мониторинга.

Активное развитие искусственного интеллекта в настоящее время не обходит стороной медицину. Алгоритмы на базе нейронных сетей уже активно используются в различных медицинских изделиях, а в будущем их доля будет только расти. Подобные инструменты позволяют существенно сократить рутинную нагрузку на специалистов, проводящих анализ ЭЭГ-обследований и расширить доступный для использования инструментарий [22].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

В настоящей работе показана эффективность применения нейросетевого подхода при анализе ЭЭГ в реальном времени. Авторы полагают, что в будущем возможно использование нейронных сетей не только для оценки уровня сознания пациента, но и для купирования возникающего приступа посредством стимуляции.

В дальнейшем планируется улучшение эффективности предложенного алгоритма за счет увеличения базы размеченных обследований и повторного обучения нейросетевой модели.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Proposal for revised clinical and electroencephalographic classification of epileptic seizures. From the Commission on Classification and Terminology of the International League Against Epilepsy. *Epilepsia*. 1981; 22 (4): 489–501. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1157.1981.tb06159.x>.
2. Sadleir L.G., Scheffer I.E., Smith S., et al. EEG features of absence seizures in idiopathic generalized epilepsy: impact of syndrome, age, and state. *Epilepsia*. 2009; 50 (6): 1572–8. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2008.02001.x>.
3. Engel J. Jr. Report of the ILAE classification core group. *Epilepsia*. 2006; 47 (9): 1558–68. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2006.00215.x>.
4. Hirsch E., French J., Scheffer I.E., et al. ILAE definition of the idiopathic generalized epilepsy syndromes: position statement by the ILAE Task Force on Nosology and Definitions. *Epilepsia*. 2022; 63 (6): 1475–99. <http://doi.org/10.1111/epi.17236>.
5. Specchio N., Wirrell E.C., Scheffer I.E., et al. International League Against Epilepsy classification and definition of epilepsy syndromes with onset in childhood: position paper by the ILAE Task Force on Nosology and Definitions. *Epilepsia*. 2022; 63 (6): 1398–442. <http://doi.org/10.1111/epi.17241>.
6. Proposal for revised classification of epilepsies and epileptic syndromes. Commission on Classification and Terminology of the International League Against Epilepsy. *Epilepsia*. 1989; 30 (4): 389–99. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1157.1989.tb05316.x>.
7. Kessler S.K., Shinnar S., Cnaan A., et al. Pretreatment seizure semiology in childhood absence epilepsy. *Neurology*. 2017; 89 (7): 673–9. <http://doi.org/10.1212/WNL.0000000000004226>.
8. Hermann B., Jones J., Dabbs K., et al. The frequency, complications and aetiology of ADHD in new onset paediatric epilepsy. *Brain*. 2007; 130 (Pt. 12): 3135–48. <http://doi.org/10.1093/brain/awm227>.
9. Fisher R.S., Cross J.H., French J.A., et al. Operational classification of seizure types by the International League Against Epilepsy: position paper of the ILAE Commission for Classification and Terminology. *Epilepsia*. 2017; 58 (4): 522–30. <http://doi.org/10.1111/epi.13670>.
10. Gotman J. Automatic detection of seizures and spikes. *J Clin Neurophysiol*. 1999; 16 (2): 130–40. <http://doi.org/10.1097/00004691-199903000-00005>.
11. Giannakaki K., Giannakakis G., Vorgia P., et al. Automatic absence seizure detection evaluating matching pursuit features of EEG signals. In: 2019 IEEE 19th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). Athens, Greece; 2019: 886–9. <http://doi.org/10.1109/BIBE.2019.00165>.
12. Glaba P., Latka M., Krause M.J., et al. Absence seizure detection algorithm for portable EEG devices. *Front Neurol*. 2021; 12: 685814. <http://doi.org/10.3389/fneur.2021.685814>.
13. Petersen E.B., Duun-Henriksen J., Mazzaretto A., et al. Generic single-channel detection of absence seizures. In: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Boston, MA, USA; 2011: 4820–3. <http://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091194>.
14. Li L., Zhang H., Liu X., et al. Detection method of absence seizures based on Resnet and bidirectional GRU. *Acta Epileptologica*. 2023; 5: 7. <http://doi.org/10.1186/s42494-022-00117-w>.
15. Asif U., Roy S., Tang J., Harter S. SeizureNet: a deep convolutional neural network for accurate seizure type classification and seizure detection. *ArXiv*. 2019: abs/1903.03232.
16. Klem G.H., Lüders H.O., Jasper H.H., Elger C. The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1999; 52: 3–6.
17. Seeck M., Koessler L., Bast T., et al. The standardized EEG electrode array of the IFCN. *Clin Neurophysiol*. 2017; 128 (10): 2070–7. <http://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.254>.
18. Shah V., von Weltin E., Lopez S., et al. The Temple University Hospital Seizure Detection Corpus. *Front Neuroinform*. 2018; 12: 83. <http://doi.org/10.3389/fninf.2018.00083>.
19. The TUH EEG Seizure Corpus (TUSZ) – v1.5.2. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/psyrivok/the-tuh-eeg-seizure-corpus-tusz-v152> (дата обращения 23.11.2023).
20. Kingma D.P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. *arXiv*. 2014: 1412.6980. <http://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>.
21. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *J Mach Learn Res*. 2014; 15: 1929–58.
22. Иванов А.А. Обзор возможностей современного программного обеспечения для регистрации и анализа ЭЭГ. *Эпилепсия и пароксизмальные состояния*. 2023; 15 (1): 53–69. <https://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2023.144>.

REFERENCES:

1. Proposal for revised clinical and electroencephalographic classification of epileptic seizures. From the Commission on Classification and Terminology of the International League Against Epilepsy. *Epilepsia*. 1981; 22 (4): 489–501. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1157.1981.tb06159.x>.
2. Sadleir L.G., Scheffer I.E., Smith S., et al. EEG features of absence seizures in idiopathic generalized epilepsy: impact of syndrome, age, and state. *Epilepsia*. 2009; 50 (6): 1572–8. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2008.02001.x>.
3. Engel J. Jr. Report of the ILAE classification core group. *Epilepsia*. 2006; 47 (9): 1558–68. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1167.2006.00215.x>.
4. Hirsch E., French J., Scheffer I.E., et al. ILAE definition of the idiopathic generalized epilepsy syndromes: position statement by the ILAE Task Force on Nosology and Definitions. *Epilepsia*. 2022; 63 (6): 1475–99. <http://doi.org/10.1111/epi.17236>.
5. Specchio N., Wirrell E.C., Scheffer I.E., et al. International League Against Epilepsy classification and definition of epilepsy syndromes with onset in childhood: position paper by the ILAE Task Force on Nosology and Definitions. *Epilepsia*. 2022; 63 (6): 1398–442. <http://doi.org/10.1111/epi.17241>.
6. Proposal for revised classification of epilepsies and epileptic syndromes. Commission on Classification and Terminology of the International League Against Epilepsy. *Epilepsia*. 1989; 30 (4): 389–99. <http://doi.org/10.1111/j.1528-1157.1989.tb05316.x>.
7. Kessler S.K., Shinnar S., Cnaan A., et al. Pretreatment seizure semiology in childhood absence epilepsy. *Neurology*. 2017; 89 (7): 673–9. <http://doi.org/10.1212/WNL.0000000000004226>.
8. Hermann B., Jones J., Dabbs K., et al. The frequency, complications and aetiology of ADHD in new onset paediatric epilepsy. *Brain*. 2007; 130 (Pt. 12): 3135–48. <http://doi.org/10.1093/brain/awm227>.
9. Fisher R.S., Cross J.H., French J.A., et al. Operational classification of seizure types by the International League Against Epilepsy: position paper of the ILAE Commission for Classification and Terminology. *Epilepsia*. 2017; 58 (4): 522–30. <http://doi.org/10.1111/epi.13670>.
10. Gotman J. Automatic detection of seizures and spikes. *J Clin Neurophysiol*. 1999; 16 (2): 130–40. <http://doi.org/10.1097/00004691-199903000-00005>.
11. Giannakaki K., Giannakakis G., Vorgia P., et al. Automatic absence seizure detection evaluating matching pursuit features of EEG signals. In: 2019 IEEE 19th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE). Athens, Greece; 2019: 886–9. <http://doi.org/10.1109/BIBE.2019.00165>.
12. Glaba P., Latka M., Krause M.J., et al. Absence seizure detection algorithm for portable EEG devices. *Front Neurol*. 2021; 12: 685814. <http://doi.org/10.3389/fneur.2021.685814>.
13. Petersen E.B., Duun-Henriksen J., Mazzaretto A., et al. Generic single-channel detection of absence seizures. In: 2011 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Boston, MA, USA; 2011: 4820–3. <http://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091194>.
14. Li L., Zhang H., Liu X., et al. Detection method of absence seizures based on Resnet and bidirectional GRU. *Acta Epileptologica*. 2023; 5: 7. <http://doi.org/10.1186/s42494-022-00117-w>.
15. Asif U., Roy S., Tang J., Harrer S. SeizureNet: a deep convolutional neural network for accurate seizure type classification and seizure detection. *ArXiv*. 2019: abs/1903.03232.
16. Klem G.H., Lüders H.O., Jasper H.H., Elger C. The ten-twenty electrode system of the International Federation. The International Federation of Clinical Neurophysiology. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1999; 52: 3–6.
17. Seeck M., Koessler L., Bast T., et al. The standardized EEG electrode array of the IFCN. *Clin Neurophysiol*. 2017; 128 (10): 2070–7. <http://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.06.254>.
18. Shah V., von Weltin E., Lopez S., et al. The Temple University Hospital Seizure Detection Corpus. *Front Neuroinform*. 2018; 12: 83. <http://doi.org/10.3389/fninf.2018.00083>.
19. The TUH EEG Seizure Corpus (TUSZ) – v1.5.2. Available at: <https://www.kaggle.com/datasets/psyryuvok/the-tuh-eeg-seizure-corpus-tusz-v152> (accessed 23.11.2023).
20. Kingma D.P., Ba J. Adam: a method for stochastic optimization. *arXiv*. 2014: 1412.6980. <http://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980>.
21. Srivastava N., Hinton G., Krizhevsky A., et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting. *J Mach Learn Res*. 2014; 15: 1929–58.
22. Ivanov A.A. Overview of current software capabilities for EEG recording and analyzing. *Epilepsia i paroksizmal'nye sostoania / Epilepsy and Paroxysmal Conditions*. 2023; 15 (1): 53–69 (in Russ.). <http://doi.org/10.17749/2077-8333/epi.par.con.2023.144>.

Сведения об авторах

Миронов Михаил Борисович – к.м.н., врач невролог-эпилептолог, ведущий научный сотрудник Медицинского центра неврологии и клинической нейрофизиологии (Москва, Россия). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4844-8042>; РИНЦ SPIN-код: 1144-7120.

Абрамов Михаил Олегович – врач функциональной диагностики, заведующий отделением видео-ЭЭГ-мониторинга ООО «Институт детской и взрослой неврологии и эпилепсии им. Святителя Луки» (Москва, Россия).

Кондратенко Владимир Витальевич – ведущий инженер отдела разработки программного обеспечения ООО «Нейрософт» (Иваново, Россия).

Вафин Илья Рамилович – инженер отдела разработки программного обеспечения ООО «Нейрософт» (Иваново, Россия).

Смирнов Сергей Юрьевич – к.т.н., ведущий инженер отдела разработки программного обеспечения ООО «Нейрософт» (Иваново, Россия).

Ваганов Сергей Евгеньевич – старший инженер отдела разработки программного обеспечения ООО «Нейрософт» (Иваново, Россия). РИНЦ SPIN-код: 5905-5974.

Иванов Алексей Алексеевич – руководитель отдела управления продуктами ООО «Нейрософт» (Иваново, Россия). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2605-6830>. E-mail: iva@neurosoft.com.

About the authors

Mikhail B. Mironov – MD, PhD, Neurologist-Epileptologist, Leading Researcher, Medical Center of Neurology and Clinical Neurophysiology (Moscow, Russia). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4844-8042>; РИНЦ SPIN-код: 1144-7120.

Mikhail O. Abramov – Functional Diagnostician, Head of Video-EEG Monitoring Department, St. Luke's Institute of Pediatric and Adult Neurology and Epilepsy (Moscow, Russia).

Vladimir V. Kondratenko – Leading Engineer, Department of Software Development, Neurosoft LLC (Ivanovo, Russia).

Ildar R. Vafin – Engineer, Department of Software Development, Neurosoft LLC (Ivanovo, Russia).

Sergey Yu. Smirnov – PhD (Engineering), Leading Engineer, Department of Software Development, Neurosoft LLC (Ivanovo, Russia).

Sergey E. Vaganov – Senior Engineer, Department of Software Development, Neurosoft LLC (Ivanovo, Russia). RSCI SPIN-code: 5905-5974.

Alexey A. Ivanov – Head of Product Management Department, Neurosoft LLC (Ivanovo, Russia). ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2605-6830>. E-mail: iva@neurosoft.com.