

ISSN 2949-5873 (print)
ISSN 2949-5881 (online)

Реабилитология

2025 | Том 3 | № 2

<https://rehabilitology.com>



2025 | Vol 3 | No 2

Journal of Medical
Rehabilitation

Данная интернет-версия статьи была скачана с сайта <https://rehabilitology.com>. 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/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.40>

ISSN 2949-5873 (print)

ISSN 2949-5881 (online)

Реабилитационный потенциал пациентов хирургического профиля с аневризмами задней соединительной артерии: современные возможности и искусственный интеллект

А.В. Василенко^{1,2}, А.С. Зарипов³, В.Е. Дружинина²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Акkuratова, д. 2, Санкт-Петербург 197341, Российская Федерация)

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Северо-западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Кирочная, д. 41, Санкт-Петербург 195015, Российская Федерация)

³ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ул. Литовская, д. 2, Санкт-Петербург 194100, Российская Федерация)

Для контактов: Анна Владимировна Василенко, E-mail: vasilenko_anna@list.ru

РЕЗЮМЕ

Аневризмы задней соединительной артерии (ЗСоА) представляют собой серьезную медицинскую проблему, связанную с высоким риском их разрыва, который ведет к тяжелому неврологическому дефициту, инвалидизации и в части случаев – к летальному исходу. Несмотря на успехи в микрохирургическом и эндоваскулярном лечении, восстановление пациентов требует длительной, комплексной и мультидисциплинарной нейрореабилитации, направленной на коррекцию двигательных, когнитивных и психосоциальных нарушений. В обзоре рассмотрены современные подходы к реабилитации, включая раннее начало, использование специализированных шкал и нейропсихологических тестов, а также перспективные методы, такие как гипербарическая оксигенация и нейромодуляция. Особое внимание уделено внедрению технологий искусственного интеллекта (ИИ) в нейрореабилитацию: применению адаптивных игровых систем, роботизированных экзоскелетов, интерфейсов «мозг – компьютер» и геймификации для персонализации и повышения эффективности восстановительных программ. Интеграция ИИ в реабилитационный процесс открывает новые возможности для улучшения функциональных исходов и качества жизни пациентов с аневризмами ЗСоА, требуя при этом дальнейших исследований и системного подхода в организации помощи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

аневризма задней соединительной артерии, разрыв, нейрореабилитация, искусственный интеллект, машинное обучение, роботизированная реабилитация, геймификация, экзоскелет, интерфейс «мозг – компьютер»

Для цитирования

Василенко А.В., Зарипов А.С., Дружинина В.Е. Реабилитационный потенциал пациентов хирургического профиля с аневризмами задней соединительной артерии: современные возможности и искусственный интеллект. *Реабилитология*. 2025; 3 (2): 103–111. <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.40>.

Rehabilitation potential of surgical patients with posterior communicating artery aneurysms: current capabilities and artificial intelligence

A.V. Vasilenko^{1,2}, A.S. Zaripov³, V.E. Druzhinina²

¹ Almazov National Medical Research Center (2 Akkuratov Str., Saint Petersburg 197341, Russian Federation)

² Mechnikov North-Western State Medical University (41 Kirochnaya Str., Saint Petersburg 191015, Russian Federation)

³ Saint Petersburg State Pediatric Medical University (2 Litovskaya Str., Saint Petersburg 194100, Russian Federation)

Corresponding author: Anna V. Vasilenko, E-mail: vasilenko_anna@list.ru

ABSTRACT

Posterior communicating artery (PCoA) aneurysms represent a serious medical problem associated with a high risk of rupture leading to severe neurologic deficits, disability, and, in some cases, death. Despite the advances in microsurgical and endovascular treatment, the recovery of patients requires long-term, comprehensive, and multidisciplinary neurorehabilitation aimed at correcting motor, cognitive, and psychosocial disorders. The present review examines current approaches to rehabilitation, including early initiation, as well as the use of specialized scales and neuropsychological tests in combination with promising methods of hyperbaric oxygenation and neuromodulation. Particular attention is paid to artificial intelligence (AI) technologies in neurorehabilitation: the use of adaptive game systems, robotic exoskeletons, brain-computer interfaces, and gamification to personalize and increase the effectiveness of recovery programs. The integration of AI into the rehabilitation process opens up new opportunities for improving the functional outcomes and quality of life in patients with PCoA aneurysms. However, further research and a systematic approach in care management are required.

KEYWORDS

posterior communicating artery aneurysm, rupture, neurorehabilitation, artificial intelligence, machine learning, robotic rehabilitation, gamification, exoskeleton, brain-computer interface

For citation

Vasilenko A.V., Zaripov A.S., Druzhinina V.E. Rehabilitation potential of surgical patients with posterior communicating artery aneurysms: current capabilities and artificial intelligence. *Reabilitologia / Journal of Medical Rehabilitation*. 2025; 3 (2): 103–111 (in Russ.). <https://doi.org/10.17749/2949-5873/rehabil.2025.40>.

ВВЕДЕНИЕ / INTRODUCTION

На сегодняшний день ведущей причиной нетравматических субарахноидальных кровоизлияний (САК) считается разрыв аневризм церебральных сосудов (около 75–80% случаев). Среди других значимых событий выделяют кровоизлияния из церебральных артериовенозных мальформаций, коагулопатии, васкулопатии, САК из измененных сосудов внутричерепных опухолей, разрыв воронки гипофиза, расслоение церебральных артерий, кровотечения вследствие приема антикоагулянтов, некоторых психоактивных и наркотических веществ.

Значительная часть нетравматических САК до настоящего момента имеет невыясненную этиологию, что, вероятно, связано с недостаточной и/или несвоевременной диагностикой, неполным предоставлением анамнеза, прогрессированием общесоматических заболеваний. Существуют факторы риска, которые способствуют появлению аневризм задней соединительной артерии (ЗСоА), – это гипертония, курение, хронический стресс, депривация сна. Также весьма значимой, по мнению многих исследователей, является наследственная предрасположенность. Данные факторы риска могут способствовать изменению структуры сосудистой стенки, увеличивая вероятность развития аневризматического процесса.

Аневризмы ЗСоА представляют собой серьезную медицинскую проблему, которая требует внимательного и детального изучения. Являясь важным сосудом, соединяющим каротидный и вертебробазилярный (ВББ) бассейны кровоснабжения головного мозга, ЗСоА играет ключевую роль в обеспечении адекватного кровотока к различным участкам мозга. Даже небольшой локальный дефект стенки артерии, сопровождающий развитие аневризмы, способен привести к ее разрыву, что, в свою очередь, может вызвать выраженный неврологический дефицит или даже повлечь за собой смерть пациента.

Аневризмы ЗСоА на протяжении длительного времени могут оставаться бессимптомными, затрудняя их раннюю клиническую диагностику. Многие пациенты не подозревают о наличии аневризмы до момента сосудистой катастрофы, что придает этой патологии особую опасность. Безусловно, современные методы диагностики, такие как магнитно-резонансная томография и компьютерная томография, позволяют выявлять аневризмы на относительно ранних стадиях заболевания, что значительно повышает шансы на успешный исход. Применяемые в настоящее время микрохирургические и эндоваскулярные вмешательства являются высокоэффективными методами лечения аневризм ЗСоА, однако выбор наиболее оптимального из них подчас затруднителен и может зависеть

от множества факторов, таких как размер аневризмы, ее форма, состояние стенки и общесоматический статус пациента.

Разрыв аневризм в ЗСоА сопряжен со значительной инвалидизацией, что создает необходимость в проведении скоординированных реабилитационных мероприятий. Для этих целей требуется мультидисциплинарная команда, состоящая из неврологов, реабилитологов, нейрофизиологов, специалистов в области лечебной физкультуры, с непременным включением физиотерапевтических методов лечения и реабилитации. Необходимость труда большого количества медицинских работников, применения специального оборудования и средств, продолжительность реабилитации в этих случаях обуславливают ее достаточно высокую стоимость. Однако неопровержимым доказательством целесообразности проведения комплексной реабилитации и затраченных финансовых и человеческих ресурсов, безусловно, является то, что в последние годы увеличивается количество положительных исходов и повышается качество жизни пациентов хирургического профиля с аневризмами ЗСоА.

ЭПИДЕМИОЛОГИЯ И ЭТИОПАТОГЕНЕЗ / EPIDEMIOLOGY AND ETIOPATHOGENESIS

В настоящее время проблема церебральных аневризм обусловлена высокой распространенностью «аневризмоносительства» в популяции. По данным аутопсии, встречаемость церебральных аневризм в Российской Федерации колеблется в пределах 1–5%. При этом частота САК вследствие разрыва аневризм в США составляет 6–28 случаев на 100 тыс. человек в год, в Китае – до 22,5 случая на 100 тыс. Аневризматические кровоизлияния поражают преимущественно больных среднего и пожилого возраста. Наиболее часто данная патология встречается в возрасте 40–60 лет¹, однако V.M. Morreale и I. Meisser в 1998 г. продемонстрировали на большой выборке разброс в пределах 40–70 лет со средним возрастом развития аневризматического САК 58 лет [1].

Аневризмы церебральных сосудов на данный момент признаны многофакторным заболеванием. Существует тенденция к их возникновению в области изгибов магистральных артерий, в зоне отхождения крупных ветвей (аневризмы задних нижних мозжечковых артерий, аневризмы бифуркации основной артерии). Имеется ряд обстоятельств, предрасполагающих к их формированию, а именно наследственная недостаточность мышечного слоя артерии, дефект эластина, перенесенные тяжелые инфекционные заболевания, атеросклеротическое поражение сосудов, черепно-мозговая травма, артериальная гипертензия и ряд других системных заболеваний.

Вазоспазм является одним из наиболее клинически актуальных звеньев патогенеза аневризматической болезни. Несмотря на широкую известность этого феномена, существует ряд разночтений даже в самом определении этого термина. В настоящий момент под вазоспазмом

понимают два разнородных, но не взаимоисключающих друг друга явления. Рентгенологический вазоспазм – это сужение просвета церебрального сосуда с замедлением его контрастирования, подтверждением которого служит наличие нормального диаметра той же артерии в предыдущих или последующих ангиографических исследованиях. Клинический вазоспазм подразумевает отсроченный неврологический дефицит ишемического генеза, составляющий большую часть отдаленных осложнений. Долгое время считалось, что с возрастом риск развития отсроченного ишемического неврологического дефицита вследствие аневризматического САК неуклонно растет, однако В.В. Крылов и др. (2011 г.) утверждают, что наименьший риск его возникновения в возрастной группе 35–65 лет [2].

Одной из патогенетических форм аневризматической болезни являются семейные аневризмы интракраниальных сосудов, под которыми понимают наличие у больного не менее двух родственников первой, второй или третьей линии родства с наличием доказанных церебральных аневризм. Риск их развития у родственников пациента, по данным J. Bromberg et al. (1995 г.), в европейской популяции в 2,7 раза выше, чем в общей популяции [3]. Похожие исследования были проведены и в США, по их результатам риск аневризм при семейных формах выше в 1,8–4,1 раза [4, 5]. Однако в общей массе семейные формы интракраниальных аневризм составляют до 7% случаев, причем в области ЗСоА они располагаются наиболее редко [4, 5].

КЛИНИКО-ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛЕЧЕНИЯ / CLINICAL AND DIAGNOSTIC FEATURES AND CURRENT TREATMENT METHODS

Аневризмы ЗСоА часто остаются бессимптомными, что затрудняет их раннюю диагностику. Догеморрагический период может характеризоваться возникновением приступов цефалгии. Е.Р. Лебедева и В.П. Сакович (2006 г.) [6] провели исследование с участием 199 пациентов с диагностированными аневризмами церебральных сосудов, 121 из которых предъявлял жалобы на периодические головные боли в догеморрагическом периоде на протяжении более 1 года. Наиболее часто пациенты описывали боли лобно-височной локализации давящего и пульсирующего характера. Продолжительность приступа цефалгии у 78 больных составляла от 1 до 5 ч. Головные боли зачастую сопровождалась артериальной гипертензией, тошнотой и светобоязнью [6].

Развитие эпилептических приступов происходит у значительного числа больных как в остром постгеморрагическом периоде, так и в отдаленном. По данным D. Campos-Fernández et al. (2024 г.) [7], в раннем периоде симптоматические приступы наблюдались у 10–20% больных с аневризматическими САК. В отдаленном периоде частота развития эпилептического синдрома со-

¹ Шаяхметов Н.Г. Результаты хирургического лечения больных с аневризмами головного мозга в республике Татарстан (в рамках реализации государственных мероприятий, направленных на совершенствование системы оказания медицинской помощи больным с сосудистыми заболеваниями). Дис. ... канд. мед. наук: Казань; 2018.

ставила 12–25%. У 56,8% пациентов при 30-минутной записи клинической электроэнцефалографии были выявлены фокальные пароксизмальные нарушения. Кортикальные поражения присутствовали у 68% больных из исследуемой группы, численность которой составила 278 человек [7].

Интересными представляются данные о формах аневризм – помимо мешотчатых, в области ЗСоА встречается около четверти всех интракраниальных фузиформных аневризм, что сопряжено с более частым их разрывом и, соответственно, более высоким уровнем стойкого неврологического дефицита, инвалидизации и летальности.

В соответствии с рекомендациями Ассоциации нейрохирургов России по лечению неразрывавшихся аневризм [8] существует следующий ряд показаний к хирургии:

- размер аневризмы ≥ 7 мм;
- несферическая форма и наличие дивертикулов;
- латеральное расположение аневризмы;
- коэффициент соотношения высоты купола аневризмы к диаметру ее шейки $>1,6$;
- коэффициент соотношения максимального размера аневризмы к диаметру несущего сосуда $>2,05$;
- угол отклонения латеральной аневризмы от несущей артерии $>112^\circ$;
- рост размера аневризмы на $\geq 0,75$ мм в течение 6 мес;
- появление новых клинических проявлений (симптомы поражения черепных нервов, нарастание и/или изменение характера головных болей, ишемические нарушения в бассейне несущей аневризму артерии);
- незамкнутость артериального круга большого мозга;
- стораживающее «перианевризматическое» окружение (контакт аневризмы с твердой мозговой оболочкой, костями черепа, черепными нервами, артериями и венами);
- множественные аневризмы;
- наличие в анамнезе кровоизлияния из другой аневризмы.

При лечении аневризм ЗСоА также используются методы микрохирургического вмешательства или эндоваскулярного выключения из кровотока. Выбор зависит от размера аневризмы, ее формы, состояния стенки, наличия дивертикулов, различных коэффициентов соотношения, угла отклонения, динамики развития аневризмы и наличия общесоматических заболеваний. Помимо стандартного для церебральных аневризм протокола диагностики при локализации в ЗСоА рекомендуется дополнительная параорбитальная косая ангиографическая проекция с поворотом головы на 55° в контралатеральную сторону, центровкой пучка на 1 см книзу от нижнелатерального угла ипсилатеральной орбиты с уклоном трубки на 12° к головному концу.

В исследовании UCAS, проведенном в 2012 г. в Японии [9], выполнен анализ риска разрыва интракраниальных аневризм в зависимости от локализации и размера на основании 5-летнего наблюдения за большой группой пациентов. Наибольший риск первичного разрыва имела группа с локализацией аневризм в ВББ, задней мозговой артерии (ЗМА) и ЗСоА – от 2,5% при размере до 7 мм до 50% при гигантских аневризмах. В группу ВББ/ЗМА/ЗСоА

были включены 445 больных с различными размерами аневризм [9]. Следует отметить, что общемировые данные могут быть существенно ниже, т.к. японская популяция эндемична по церебральным аневризмам.

На клиническое течение аневризм ЗСоА влияет вид строения виллизиева круга, который чаще всего определяется состоянием ЗСоА и ЗМА, количеством аневризм и типом развития. При фетальном типе развития ЗСоА на фоне меньшего диаметра несущего сосуда отмечают более высокую скорость как внутриартериального кровотока, так и аневризматического потока. К. Tanaka et al. (2023 г.) [10] на основании исследования 55 больных с аневризмами ЗСоА, представленными фетальным и взрослым типами строения, отмечают увеличение внутрианевризматического потока более чем в 3 раза у пациентов с фетальным типом (0,190 против 0,061 м/с), также авторы обращают внимание на больший объем остаточного потока. К сожалению, ими недостаточно описана роль фетального типа в первичном формировании аневризм ЗСоА, однако сделаны выводы о более высоком риске рецидива аневризм ЗСоА при фетальном типе строения сосуда [10]. Существует и противоположное мнение: J. Chung et al. (2023 г.) на основании исследования 95 случаев лечения больных с аневризмами ЗСоА с катмезом ≥ 6 мес ставят под сомнение роль фетального типа в их рецидивах [11].

Гигантские аневризмы, в особенности локализованные в ЗСоА, ЗМА, ВББ, способны вызывать клинически значимый масс-эффект с развитием очагового неврологического дефицита, парезов черепных нервов и компрессии ствола мозга. Специфическим осложнением для аневризм ЗСоА считается парез III пары черепных нервов, проявляющийся классической триадой (птоз, мидриаз, расходящееся косоглазие) и диплопией. Развитие данного осложнения характерно для аневризм большого и гигантского размера, в связи с чем может сочетаться с разными формами очагового неврологического дефицита, возникшего на фоне масс-эффекта. Часто именно клиника пареза глазодвигательного нерва служит первичным поводом для обращения.

В 2024 г. в Греции O.E. Makri et al. описали случай больного с картиной синдрома Терсона и парезом III пары, при углубленном обследовании которого была обнаружена 5-миллиметровая аневризма ЗСоА, которая в последующем была клипирована [12]. Не менее интересный случай представили S. Mishra et al. (2024 г.): за помощью обратился пациент, у которого при осмотре был выявлен изолированный ипсилатеральный паралич отводящего нерва и контралатеральная гомонимная гемианопсия, позже связанная с масс-эффектом выявленной аневризмы ЗСоА [13]. R. Abo Kasem et al. (2024 г.) сравнили исходы пареза глазодвигательного нерва после проведения микрохирургической операции и эндоваскулярного вмешательства. В результате у группы, перенесшей микрохирургическую процедуру, в краткосрочной перспективе получен лучший результат по сравнению с группой эндоваскулярно прооперированных пациентов, однако при долгосрочном наблюдении через 18 и 24 мес выявлены сопоставимые показатели ($p=0,36$ и $p=0,24$ соответственно) [14].

НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИЯ / NEUROREHABILITATION

Современные возможности / Current capabilities

Значительные успехи в лечении САК привели к снижению летальности [15] и, как следствие, увеличению потребности в улучшенной стратегии реабилитации пациентов: по меньшей мере 50% больных остаются с неврологическим дефицитом и когнитивными нарушениями, а у более чем 90% снижается качество жизни [16, 17].

Тем не менее в настоящее время не существует разработанной оптимальной модели нейрореабилитации для пациентов с САК. Подход к реабилитации во многом основывается на знаниях специалистов, работающих в конкретных стационарах и реабилитационных центрах. Более того, по данным различных исследований, не все больные с САК проходят реабилитационную оценку. Так, согласно результатам исследования E.A. Lynch et al. (2015 г.) реабилитационную оценку не получили 37% пациентов с САК [18]. Y.T. Chen et al. сообщили, что из 11 234 больных с САК 4721 (42%) не был рандомизирован для реабилитации, а в 20% больниц Китая никогда не проводится реабилитационная оценка для пациентов с САК, и лишь в 25% медицинских учреждений выполняется оценка реабилитации для всех таких больных [19]. Это подтверждает отсутствие систематического подхода к проведению реабилитационной оценки пациентов с САК, а также свидетельствует о серьезных пробелах в организации реабилитационной помощи. Такая ситуация может привести к недооценке потребностей пациентов и снижению эффективности восстановления.

Согласно исследованию K.V. Mahaney et al. (2012 г.) у 77,7% пациентов без послеоперационных неврологических нарушений наблюдалась положительная динамика выздоровления, а в группе больных с неврологическим дефицитом она отмечена у 46,2% [20]. По данным H.H. Stabel et al. (2017 г.), 44% пациентов с САК после выписки из отделения интенсивной терапии имели серьезную инвалидность [21].

A. Lindner et al. (2023 г.) [22] делают вывод о необходимости ранней нейрореабилитации: из 215 пациентов с оценкой 1–5 баллов по модифицированной шкале Рэнкина (англ. modified Rankin Scale, mRS) функциональное улучшение отмечено у 122 (57%) в течение первых 3 мес после САК, улучшение в течение 3–12 мес – у 35 (16%). Через 1 год у 179 больных показатель по mRS составлял меньше 3 баллов. По мнению авторов, более молодой возраст и более низкий показатель по шкале Ханта–Хесса при поступлении в отделение интенсивной терапии являются факторами, которые могут помочь в определении пациентов с более высоким потенциалом для восстановления. Помимо указанных показателей предикторами функционального восстановления являлись мужской пол, более низкий балл по mRS при выписке из отделения интенсивной терапии, а также меньшее количество дней на искусственной вентиляции легких [22].

Когнитивный дефицит имеет большое влияние на качество жизни пациентов с САК. Психосоциальные и нейроповеденческие изменения являются обременительными не только для больных, но и для их семей. Перенесенное

САК приводит к снижению когнитивных функций быстрее, чем другие нервно-сосудистые нарушения, включая ишемический инсульт, а также связано с большим (в 2,6 раза) риском деменции в течение 10 лет после разрыва по сравнению с населением в целом [23–26]. Однако информации о когнитивной реабилитации пациентов в остром периоде САК недостаточно, несмотря на выраженный когнитивный дефицит в этом периоде.

В остром периоде используются такие нейропсихологические шкалы, как mRS, Монреальская когнитивная шкала (англ. Montreal Cognitive Assessment, MoCA) и Краткая шкала оценки психического статуса (англ. Mini-Mental State Examination, MMSE), однако, по мнению некоторых авторов, данные тесты плохо предсказывают незначительные когнитивные нарушения [27]. Наиболее часто у пациентов с САК развиваются нарушения памяти, исполнительных и языковых функций. Для их оценки исследователи предлагают использовать тест непрерывной зрительной памяти (англ. Continuous Visual Memory Test, CVMT), Калифорнийский тест на вербальное обучение (англ. California Verbal Learning Test, CVLT), тест Струпа (англ. Stroop Test), Висконсинский тест сортировки карточек (англ. Wisconsin Card Sorting Test, WCST), Бостонский тест называния (англ. Boston Naming Test, BNT) и др. [23].

Следует отметить, что связь между локализацией аневризмы и когнитивными нарушениями остается не до конца ясной. Так, K.T. Kreiter et al. (2002 г.) отмечают, что исполнительная дисфункция менее выражена при аневризмах артерий задних отделов мозга, чем при аневризмах других локализаций [28]. Другие авторы сообщают об отсутствии связи когнитивных нарушений с местом разрыва аневризмы [29]. Некоторые исследователи предполагают, что САК не приводит к очаговым нарушениям, а вызывает диффузное поражение тканей головного мозга [30], что обуславливает развитие в последующем именно генерализованных (чаще атонических) эпилептических приступов, а не вторично-генерализованных с формированием очага, как этого можно было бы ожидать теоретически.

Несмотря на важность нейрореабилитации пациентов в остром периоде, треть больных сохраняют часть функциональных нарушений [31]. В долгосрочной перспективе у 12% больных наблюдаются трудности с выполнением повседневных видов деятельности, связанных с самообслуживанием, таких как прием пищи, гигиена, одевание, купание и пользование туалетом. При этом выполнение более сложных задач, включающих управление финансами, совершение покупок, использование транспорта, прием лекарств и ведение домашнего хозяйства, остаются недоступными для 93% пациентов. Кроме того, от 40% до 80% больных не возвращаются к своей прежней профессиональной деятельности [32]. В связи с этим значительно снижается их качество жизни, что приводит к усталости и нарушениям сна без значительных улучшений в период 24 мес, а также к развитию депрессии и тревоги, сохраняющейся на протяжении 18 мес [33–35].

Согласно современным исследованиям перспективными методами в реабилитации пациентов с САК являются гипербарическая оксигенация и нейромодуляция [12]. Ги-

пербарическая оксигенация уменьшает воспаление, отек, увеличивает мозговой кровоток и уменьшает размер инфаркта. Однако несвоевременное лечение может усилить ишемию головного мозга [27, 36]. В исследовании такого вида нейростимуляции, как транскраниальная прямая стимуляция (англ. transcranial direct current stimulation, tDCS), применение tDCS спустя 3 и 4 дня после САК уменьшило тяжесть вазоспазма [37].

Таким образом, трудности, с которыми сталкиваются пациенты, перенесшие САК, подчеркивают необходимость длительной, качественной и многопрофильной реабилитации.

Искусственный интеллект / Artificial intelligence

Прогресс информационных технологий в последние десятилетия невозможно не заметить как в повседневной, так и в профессиональной деятельности. Открываются новые горизонты в автоматизировании многих стандартных процессов, обработки гигантских массивов данных, их анализа. Все большее распространение получают самообучающиеся программные продукты, происходит развитие искусственного интеллекта (ИИ).

Современные технологии ИИ включают машинное обучение, где алгоритмы обучаются на данных для улучшения результатов, и глубокое обучение, использующее нейронные сети для обработки больших объемов информации. В данный момент ИИ находит применение в различных сферах, включая медицину, сектор финансов, транспорта, сферу услуг, военную отрасль, и продолжает развиваться, открывая возможности и создавая вызовы для общества.

ИИ в медицине представляет собой быстро развивающуюся область, которая использует алгоритмы и модели для анализа медицинских данных, улучшения диагностики, разработки персонализированных методов лечения и оптимизации процессов в здравоохранении. Среди ключевых направлений использования ИИ в медицине необходимо отметить варианты его применения в диагностике, основанные на больших объемах данных ранее проанализированных кейсов, что позволяет достичь высокой точности результатов. Благодаря своей способности выявлять сложные паттерны и адаптироваться к индивидуальным особенностям пациентов ИИ становится незаменимым инструментом в разработке персонализированных программ реабилитации для таких сложных клинических состояний, как аневризмы ЗСоА. Именно многообразие неврологических нарушений и непредсказуемость восстановления при аневризмах ЗСоА требуют постоянной корректировки реабилитационных программ.

Также возможно использование ИИ с целью прогнозирования заболеваний. Системы ИИ могут анализировать данные о пациентах для определения вероятности развития определенных заболеваний, что позволяет персонализировать профилактические меры и проводить эффективную раннюю диагностику. В настоящее время происходит активная цифровизация документооборота в здравоохранении, где также применяется ИИ, который автоматизирует обработку и анализ больших объемов медицинских данных, облегчая работу медицинского

персонала и повышая эффективность управления здравоохранением.

Перспективным направлением внедрения ИИ является телемедицина. Он может использоваться в приложениях для дистанционного мониторинга состояния здоровья пациентов, что позволяет врачам отслеживать изменения в реальном времени и принимать необходимые меры. Это особенно актуально в России, где существует огромное количество отдаленных населенных пунктов, для жителей которых доступ к качественной медицинской помощи крайне затруднен. Роботизированные системы и ИИ применяются в хирургии для выполнения высокоточных операций с минимальной инвазией, что снижает риск осложнений и ускоряет восстановление пациентов. Помимо хирургии существует практика использования роботизированных систем в реабилитации, преимущественно с патологией центральной нервной системы. Также существуют перспективы внедрения ИИ в клинические исследования, где он может помочь в анализе данных, ускоряя процесс разработки новых лекарств и методов лечения.

В последние годы появилась тенденция применения алгоритмов ИИ и в нейрореабилитации. Значительная доля этого опыта приходится на пациентов, перенесших острое нарушение мозгового кровообращения, в т.ч. на фоне аневризматической болезни. В начале 2025 г. I. Doumas et al. [38] опубликовали результаты апробации возможностей самоадаптивной игры с динамической регулировкой уровня сложности для когнитивной и моторной реабилитации больных после инсульта. Проверка проводилась с участием 24 пациентов и использованием 5-дневного протокола (2 дня – оценка функционального дефицита, 3 дня – тренировочные сессии). Авторы оценивают данный опыт положительно и отмечают возможность автоматической адаптации программы для конкретного пациента, позволяющей предлагать ему двигательные и когнитивные упражнения, адекватные тяжести состояния [38].

В 2024 г. вышло в свет проспективное контролируемое рандомизированное исследование Национального реабилитационного центра Южной Кореи [39], в котором ученые дали оценку клинической эффективности реабилитации пациентов с парезом верхних конечностей вследствие нарушений мозгового кровообращения с использованием алгоритма нейрокомпьютерного интерфейса (англ. brain-computer interface, BCI) с обратной связью и без нее. Результативность сравнивалась через 4 нед реабилитации с оценкой разгибательной силы запястья. Эффективность реабилитационных мероприятий в группе BCI с обратной связью была выше, чем у группы без таковой, что свидетельствует о возможности эффективного использования ИИ-алгоритмов в игровых формах реабилитации больных [39].

Применение инновационных технологий возможно и в реабилитации пациентов с ограничением функций нижних конечностей. Одним из наиболее перспективных направлений является применение робототехники с использованием конструкций по типу экзоскелета. С. Livolsi et al. (2025 г.) [40] провели исследование, в котором поставлена проблема эффективности роботизированной реабилитации пациентов с парезами нижних конечностей.

стей в сравнении с реабилитацией без использования робота. Критерием эффективности служило увеличение скорости передвижения. В результате показана эффективность применения экзоскелетов с увеличением скорости передвижения в среднем на $0,14 \pm 0,03$ м/с ($p=0,015$). Это объясняется тем, что устройство самостоятельно выбирает количество шагов и их длину как на пораженной, так и на интактной конечности. Использование подобных технологий может способствовать увеличению мобильности пациента, ограничение которой является важной проблемой при реинтеграции в общество [40].

Аналогичную проблему изучали S. Costantini et al. (2024 г.) [41], которые с помощью алгоритмов ИИ оценили вовлеченность пациентов в роботическую реабилитацию при помощи показателей динамики сердечного ритма и данных регистрации электрических потенциалов с кожи больного. В исследовании приняли участие 46 пациентов с различными формами моторных дефицитов. Во время прохождения реабилитации был проведен сбор анкет, которые заполняли как сами больные, так и курирующие медицинские работники, результаты были ранжированы на три уровня. Физиологические данные пациента во время реабилитации поступали с помощью браслета E4 (Empatica, США), с их учетом алгоритм оценивал уровень вовлеченности и выбирал режим реабилитации. Точность работы алгоритма составила около 95% [41].

Еще одним активно развивающимся направлением нейрореабилитации является геймификация – использование игровых устройств в восстановлении пациентом утраченных навыков. Выделяют четыре основных типа устройств: моторизованные, немоторизованные, виртуальной реальности и нейромышечной электрической стимуляции. Игровые устройства применяются в реабилитации моторного и когнитивного дефицита. В 2024 г. J.J. Sánchez-Gil et al. [42] выпустили обзор 169 исследо-

ваний с участием более 6000 пациентов, при реабилитации которых были использованы игровые устройства. В результате выявлено повышение эффективности комплексных реабилитационных мероприятий, в частности улучшение моторного, когнитивного статуса. Также авторы отметили положительное влияние реабилитационной помощи на эмоциональный и социальный фон и качество жизни пациентов [42].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ / CONCLUSION

Таким образом, поскольку ЗСоА играет ключевую роль в обеспечении кровоснабжения головного мозга, аневризмы данной артерии занимают особое место в структуре патологии. Разрыв аневризм ЗСоА может привести к тяжелым неврологическим последствиям, инвалидизации и даже смерти пациента, что подчеркивает важность своевременной диагностики и лечения.

Тем не менее, несмотря на значительные успехи в лечении САК, для минимизации риска осложнений, восстановления неврологических и когнитивных функций, необходима длительная и комплексная реабилитация. Реабилитация больных с аневризмами ЗСоА требует мультидисциплинарного подхода с привлечением специалистов разных медицинских областей, что делает процесс дорогостоящим, но оправданным, учитывая увеличение числа положительных исходов и улучшение качества жизни пациентов.

Аневризмы ЗСоА остаются серьезной медицинской проблемой, требующей дальнейшего изучения, совершенствования методов диагностики, лечения и реабилитации. Комплексный подход к ведению таких пациентов является залогом успешного восстановления и снижения инвалидизации. Применение ИИ в медицине, особенно в нейрореабилитации, может открыть новые горизонты для улучшения качества медицинской помощи и повышения эффективности лечения.

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ	ARTICLE INFORMATION
Поступила: 01.02.2025 В доработанном виде: 09.04.2025 Принята к печати: 23.05.2025 Опубликована: 30.06.2025	Received: 01.02.2025 Revision received: 09.04.2025 Accepted: 23.05.2025 Published: 30.06.2025
Вклад авторов	Authors' contribution
Все авторы принимали равное участие в сборе, анализе и интерпретации данных. Все авторы прочитали и утвердили окончательный вариант рукописи	All authors participated equally in the collection, analysis and interpretation of the data. All authors have read and approved the final version of the manuscript
Конфликт интересов	Conflict of interests
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов	The authors declare no conflict of interests
Финансирование	Funding
Авторы заявляют об отсутствии финансовой поддержки	The authors declare no funding
Этические аспекты	Ethics declarations
Неприменимо	Not applicable
Комментарий издателя	Publisher's note
Содержащиеся в этой публикации утверждения, мнения и данные были созданы ее авторами, а не издательством ИРБИС (ООО «ИРБИС»). Издательство снимает с себя ответственность за любой ущерб, нанесенный людям или имуществу в результате использования любых идей, методов, инструкций или препаратов, упомянутых в публикации	The statements, opinions, and data contained in this publication were generated by the authors and not by IRBIS Publishing (IRBIS LLC). IRBIS LLC disclaims any responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred in the content

Права и полномочия	Rights and permissions
© 2025 Авторы; ООО «ИРБИС» Статья в открытом доступе по лицензии CC BY-NC-SA (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)	© 2025 The Authors. Publishing services by IRBIS LLC This is an open access article under CC BY-NC-SA license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Morreale V.M., Meissner I. Intracranial aneurysms. In: Yanagihara T., Piepgras D.G., Atkinson J.L.D. (Eds) Subarachnoid hemorrhage: medical surgical management. New York: CRC Press; 1997: 584 pp.
- Крылов В.В. (ред.) Микрохирургия аневризм головного мозга. М.; 2011: 536 с.
- Krylov V.V. (Ed.) Microsurgery of brain aneurysms. Moscow; 2011: 536 pp. (in Russ.).
- Bromberg J.E., Rinkel G.J., Algra A., et al. Subarachnoid hemorrhage in first and second degree relative of patients with subarachnoid hemorrhage. *Br Med J*. 1995; 311 (7000): 288–9. <https://doi.org/10.1136/bmj.311.7000.288>.
- Wang P.S., Longstreth W.T. Jr, Koepsell T.D. Subarachnoid hemorrhage and family history: a population-based case-control study. *Arch Neurol*. 1995; 52: 202–4.
- Schievink W.I. Genetics of intracranial aneurysms. *Neurosurgery*. 1997; 40 (4): 615–62. <https://doi.org/10.1097/00006123-199704000-00001>.
- Лебедева Е.Р., Сакович В.П. Головные боли у больных с интракраниальными аневризмами в догеморрагический период. *Уральский медицинский журнал*. 2006; 20 (1): 8–11.
- Lebedeva E.R., Sakovich V.P. Headaches in patients with intracranial aneurysms in the prehemorrhagic period. *Ural Medical Journal*. 2006; 20 (1): 8–11 (in Russ.).
- Campos-Fernández D., Montes A., Thonon V., et al. Early focal electroencephalogram and neuroimaging findings predict epilepsy development after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Epilepsy Behav*. 2024; 156: 109841. <https://doi.org/10.1016/j.yebeh.2024.109841>.
- Ассоциация нейрохирургов России. Клинические рекомендации по лечению неразорвавшихся аневризм головного мозга. URL: <https://www.ruans.org/Documents> (дата обращения 12.01.2025). Association of Neurosurgeons of Russia. Clinical guidelines for the treatment of unruptured cerebral aneurysms. Available at: <https://www.ruans.org/Documents> (in Russ.) (accessed 12.01.2025).
- Morita A., Kirino T., Hashi K., et al. The natural course of unruptured cerebral aneurysms in a Japanese cohort. *N Engl J Med*. 2012; 366 (26): 2474–82. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa1113260>.
- Tanaka K., Furukawa K., Ishida F., Suzuki H. Hemodynamic differences of posterior communicating artery aneurysms between adult and fetal types of posterior cerebral artery. *Acta Neurochir*. 2023; 165 (12): 3697–706. <https://doi.org/10.1007/s00701-023-05840-y>.
- Chung J., Cheong J.H., Kim J.M., et al. Is fetal-type posterior cerebral artery a risk factor for recurrence in coiled internal carotid artery-incorporating posterior communicating artery aneurysms? Analysis of conventional statistics, computational fluid dynamics, and random forest with hyper-ensemble approach. *Neurosurgery*. 2023; 93 (3): 611–21. <https://doi.org/10.1227/neu.0000000000002458>.
- Makri O.E., Tsekouras I.K., Mastronikolis S.N., et al. Terson's syndrome with Roth spot-resembling features and third nerve palsy without radiologically diagnosed subarachnoid haemorrhage. *Vision*. 2024; 8 (4): 61. <https://doi.org/10.3390/vision8040061>.
- Mishra S., Mishra S., Regmi S., et al. Isolated ipsilateral abducens nerve palsy and contralateral homonymous hemianopia associated with unruptured posterior cerebral artery aneurysm: a rare neurological finding. *J Cerebrovasc Endovasc Neurosurg*. 2024; 26 (3): 318–23. <https://doi.org/10.7461/jcen.2024.E2023.07.002>.
- Abo Kasem R., Cunningham C., Elawady S.S., et al. Oculomotor nerve palsy recovery following microsurgery vs. endovascular treatment of posterior communicating artery aneurysms: a comparative meta-analysis of short- and long-term outcomes. *Neurosurg Rev*. 2024; 47 (1): 904. <https://doi.org/10.1007/s10143-024-03149-7>.
- Lovelock C.E., Rinkel G.J., Rothwell P.M. Time trends in outcome of subarachnoid hemorrhage: population-based study and systematic review. *Neurology*. 2010; 74 (19): 1494–1501. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3181dd42b3>.
- Taufique Z., May T., Meyers E., et al. Predictors of poor quality of life 1 year after subarachnoid hemorrhage. *Neurosurgery*. 2016; 78 (2): 256–64. <https://doi.org/10.1227/NEU.0000000000001042>.
- Dombovy M.L., Drew-Cates J., Serdars R. Recovery and rehabilitation following subarachnoid haemorrhage: Part II. Long-term follow-up. *Brain Inf*. 1998; 12 (10): 887–94. <https://doi.org/10.1080/026990598122106>.
- Lynch E.A., Luker J.A., Cadilhac D.A., Hillier S.L. Rehabilitation assessments for patients with stroke in Australian hospitals do not always reflect the patients' rehabilitation requirements. *Arch Phys Med Rehabil*. 2015; 96 (5): 782–9. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2014.12.009>.
- Chen Y.T., Wu M.R., Li Z.X., et al. Assessment of rehabilitation following subarachnoid haemorrhage in China: findings from the Chinese Stroke Center Alliance. *BMC Neurol*. 2023; 23: 291. <https://doi.org/10.1186/s12883-023-03349-6>.
- Mahaney K.B., Todd M.M., Bayman E.O., Torner J.C. Acute postoperative neurological deterioration associated with surgery for ruptured intracranial aneurysm: incidence, predictors, and outcomes. *J Neurosurg*. 2012; 116 (6): 1267–78. <https://doi.org/10.3171/2012.1.JNS111277>.
- Stabel H.H., Pedersen A.R., Johnsen S.P., Nielsen J.F. Functional independence: a comparison of the changes during neurorehabilitation between patients with nontraumatic subarachnoid hemorrhage and patients with intracerebral hemorrhage or acute ischemic stroke. *Arch Phys Med Rehabil*. 2017; 98 (4): 759–65. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2016.11.010>.
- Lindner A., Brunelli L., Rass V., et al. Long-term clinical trajectory of patients with subarachnoid hemorrhage: linking acute care and neurorehabilitation. *Neurocrit Care*. 2023; 38 (1): 138–48. <https://doi.org/10.1007/s12028-022-01572-6>.
- Abdelgadir J., Gelman J., Dutko L., et al. Cognitive outcomes following aneurysmal subarachnoid hemorrhage: rehabilitation strategies. *World Neurosurg*. 2024; 22: 100341. <https://doi.org/10.1016/j.wnsx.2024.100341>.
- Wong G.K.C., Nung R.C.H., Sitt J.C.M., et al. Location, infarct load, and 3-month outcomes of delayed cerebral infarction after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Stroke*. 2015; 46 (11): 3099–104. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.115.010844>.
- Rost N.S., Brodtmann A., Pase M.P., et al. Post-stroke cognitive impairment and dementia. *Circ Res*. 2022; 130 (8): 1252–71. <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.122.319951>.
- Corraini P., Henderson V.W., Ording A.G., et al. Long-term risk of dementia among survivors of ischemic or hemorrhagic stroke. *Stroke*. 2017; 48 (1): 180–6. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.116.015242>.
- Nwafor D.C., Kirby B.D., Ralston J.D., et al. Neurocognitive sequelae and rehabilitation after subarachnoid hemorrhage: optimizing outcomes. *J Vasc Dis*. 2023; 2 (2): 197–211. <https://doi.org/10.3390/jvd2020014>.
- Kreiter K.T., Copeland D., Bernardini G.L., et al. Predictors of cognitive dysfunction after subarachnoid hemorrhage. *Stroke*. 2002; 33 (1): 200–8. <https://doi.org/10.1161/hs0102.101080>.
- Orbo M., Waterloo K., Egge A., et al. Predictors for cognitive impairment one year after surgery for aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *J Neurol*. 2008; 255 (11): 1770–6. <https://doi.org/10.1007/s00415-008-0047-z>.
- Bellebaum C., Schäfers L., Schoch B., et al. Clipping versus coiling: neuropsychological follow up after aneurysmal subarachnoid haemorrhage (SAH). *J Clin Exp Neuropsychol*. 2004; 26 (8): 1081–92. <https://doi.org/10.1080/13803390490515342>.
- Wu X., Zhang L., Chen Y., et al. Effectiveness and influencing factors of comprehensive rehabilitation therapy in patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *J Behav Brain Sci*. 2020; 10 (10): 387–99. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2020.1010024>.
- Shukla D.P. Outcome and rehabilitation of patients following aneurysmal subarachnoid haemorrhage. *J Neuroanaesth Crit Care*. 2017; 4 (4): S65–75. <https://doi.org/10.4103/2348-0548.199952>.

33. Al-Khindi T., Macdonald R.L., Schweizer T.A. Cognitive and functional outcome after aneurysmal subarachnoid hemorrhage. *Stroke*. 2010; 41 (8): e519-36. <https://doi.org/10.1161/STROKEAHA.110.581975>.
34. Powell J., Kitchen N., Heslin J., Greenwood R. Psychosocial outcomes at three and nine months after good neurological recovery from aneurysmal subarachnoid haemorrhage: predictors and prognosis. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2002; 72 (6): 772–81. <https://doi.org/10.1136/jnnp.72.6.772>.
35. Powell J., Kitchen N., Heslin J., Greenwood R. Psychosocial outcomes at 18 months after good neurological recovery from aneurysmal subarachnoid haemorrhage. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2004; 75 (8): 1119–24. <https://doi.org/10.1136/jnnp.2002.000414>.
36. Wang Y., Gao Y., Lu M., Liu Y. Long-term functional prognosis of patients with aneurysmal subarachnoid hemorrhage treated with rehabilitation combined with hyperbaric oxygen: case-series study. *Medicine*. 2020; 99 (3): e18748. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000018748>.
37. Malinova V., Bleuel K., Stadelmann C., et al. The impact of transcranial direct current stimulation on cerebral vasospasm in a rat model of subarachnoid hemorrhage. *J Cereb Blood Flow Metab*. 2021; 41 (8): 2000–9. <https://doi.org/10.1177/0271678X21990130>.
38. Dumas I., Lejeune T., Edwards M., et al. Clinical validation of an individualized auto-adaptative serious game for combined cognitive and upper limb motor robotic rehabilitation after stroke. *J Neuroeng Rehabil*. 2025; 22 (1): 10. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01551-w>.
39. Kim M.S., Park H., Kwon I., et al. Efficacy of brain-computer interface training with motor imagery-contingent feedback in improving upper limb function and neuroplasticity among persons with chronic stroke: a double-blinded, parallel-group, randomized controlled trial. *J Neuroeng Rehabil*. 2025; 22 (1): 1. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01535-2>.
40. Livolsi C., Conti R., Ciapetti T., et al. Bilateral hip exoskeleton assistance enables faster walking in individuals with chronic stroke-related gait impairments. *Sci Rep*. 2025; 15 (1): 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86343-x>.
41. Costantini S., Falivene A., Chiappini M., et al. Artificial intelligence tools for engagement prediction in neuromotor disorder patients during rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil*. 2024; 21 (1): 215. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01519-2>.
42. Sánchez-Gil J.J., Sáez-Manzano A., López-Luque R., et al. Gamified devices for stroke rehabilitation: a systematic review. *Comput Methods Programs Biomed*. 2025; 258: 108476. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2024.108476>.

Сведения об авторах / About the authors

Василенко Анна Владимировна, к.м.н., доцент / **Anna V. Vasilenko**, PhD, Assoc. Prof. – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0190-3335>. Scopus Author ID: 35773656400. eLibrary SPIN-code: 2730-3920. E-mail: vasilenko_anna@list.ru.

Зарипов Александр Сергеевич / Aleksandr S. Zaripov – ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6735-3959>. eLibrary SPIN-code: 1369-5017.

Дружинина Валерия Евгеньевна / Valeriya E. Druzhinina – ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1600-9389>. eLibrary SPIN-code: 8430-9680.