

Разработка программного комплекса для оценки и реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ишемическим инсультом головного мозга

Толмачев И.В., Алифирова В.М., Казаков С.Д., Королева Е.С.

*Сибирский государственный медицинский университет (СибГМУ)
Россия, 634050, г. Томск, Московский тракт, 2*

РЕЗЮМЕ

Цель работы – разработка специализированного программного обеспечения, позволяющего воссоздавать контролируемую виртуальную среду с возможностью фиксации параметров движения человека для оценки и реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ишемическим инсультом (ИИ) головного мозга

Материалы и методы. Для оценки влияния визуальных стимулов, воссозданных при помощи системы дополненной реальности на двигательную функцию, разработано программное обеспечение, визуализирующее данные на очках дополненной реальности и позволяющее обрабатывать данные, получаемые с сенсоров захвата движений. Исследование проводилось на базе кафедры неврологии и нейрохирургии, кафедры медицинской и биологической кибернетики СибГМУ в 2018–2019 гг. Размер выборки составил 59 пациентов с острой ИИ головного мозга в бассейне средней мозговой артерии. Курс моторной реабилитации с применением технологии дополненной реальности составил 10 дней. Длительность одной тренировки – 60 мин.

Результаты. Моторная нейрореабилитация у пациентов с парезами верхних конечностей методом дополненной реальности позволяет добиться улучшения двигательных навыков. Анализ точности движений показал, что по мере увеличения количества тренировок, у пациентов увеличивается точность следования заданной траектории. Выявлено достоверное увеличение количества завершённых движений с каждой последующей тренировкой, что свидетельствует об увеличении скорости выполнения задания с течением времени реабилитации, а также о сокращении периода отдыха между выполняемыми подходами во время одной тренировки.

Заключение. Разработанное специализированное программное обеспечение позволяет воссоздавать контролируемую виртуальную среду с возможностью фиксации параметров движения человека. Метод применялся для реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ИИ головного мозга и парезами верхних конечностей. По результатам исследования выявлено достоверное увеличение точности движений, а также увеличение выносливости, что свидетельствует об эффективности используемого подхода в процессе моторной нейрореабилитации.

Ключевые слова: ишемический инсульт, нейропластичность, нейрореабилитация, нейротехнологии, регистрация движений, двигательные нарушения, видеозахват, нейронная сеть, программное обеспечение.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Работа проведена в рамках выполнения гранта РНФ «Разработка научных основ роботизированной нейроморфной реабилитации». Соглашение № 18-15-00082 173.

✉ Толмачев Иван Владиславович, e-mail ivantolm@mail.ru.

Соответствие принципам этики. Все участники исследования подписали информированное согласие. Исследование одобрено локальным этическим комитетом СибГМУ (протокол № 5961 от 14.06.2018).

Для цитирования: Толмачев И.В., Алифирова В.М., Казаков С.Д., Королева Е.С. Разработка программного комплекса для оценки и реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ишемическим инсультом головного мозга. *Бюллетень сибирской медицины*. 2019; 18 (4): 136–142. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-4-136-142>.

УДК 616.831-005.1/.4-07-08:004.4

<https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-4-136-142>

Software complex for assessment and rehabilitation of motor disorders in patients with ischemic stroke

Tolmachev I.V., Alifirova V.M., Kazakov S.D., Koroleva E.S.

*Siberian State Medical University (SSMU)
2, Moscow Trakt, Tomsk, 634050, Russian Federation*

ABSTRACT

Objective. Development of a specialized software complex that creates a controlled virtual environment as well as to capture and calculate the movement data in the process of rehabilitation.

Materials and methods. To evaluate the impact of visual stimuli created using the augmented reality system on the motor function, a software was developed that visualizes data via augmented reality glasses and processes data obtained from motion capture sensors. The study was conducted at the Department of Neurology and Neurosurgery and the Department of Medical and Biological Cybernetics of Siberian State Medical University in 2018–2019. The sample included 59 patients with acute ischemic cerebral stroke in the middle cerebral artery. The course of motor rehabilitation using augmented reality technology was ten days. The duration of one training session was 60 minutes.

Results. Motor neurorehabilitation of patients with paresis of the upper extremities using augmented reality makes it possible to improve motor skills. Analysis of the accuracy of movements showed a significant increase in the value of the spectral criterion with an increase in the number of trainings, which indicates a decrease in the number of unnecessary movements during the main task. A significant increase in the number of completed movements with each subsequent training was revealed. This indicates a rise in the speed of the task over the course of rehabilitation, as well as reduction of the rest period between the attempts performed during one training session.

Conclusion. The developed specialized software recreates a controlled virtual environment with the ability to register the parameters of human movement. The method was used for rehabilitation of motor disorders in patients with ischemic stroke of the brain and paresis of the upper extremities. The results of the study revealed a significant increase in the accuracy of movements, and a rise in endurance, which indicates the effectiveness of the approach in motor neurorehabilitation.

Key words: ischemic stroke, neuroplasticity, neurorehabilitation, neurotechnology, motion registration, motor impairment, video capture, neural network, software.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Source of financing. The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation “Elaborating the scientific background of robot-assisted neurorehabilitation”. Agreement No. 18-15-00082 173.

Conformity with the principles of ethics. All patients included in the study signed an informed consent. The study was approved by the local Ethics Committee at SSMU (Protocol No. 5961 of 14.06.2018).

For citation: Tolmachev I.V., Alifirova V.M., Kazakov S.D., Koroleva E.S. Software complex for assessment and rehabilitation of motor disorders in patients with ischemic stroke. *Bulletin of Siberian Medicine*. 2019; 18 (4): 136–142. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-4-136-142>.

ВВЕДЕНИЕ

На качество жизни человека большое влияние оказывает его способность эффективно занимать определенное положение в пространстве и экономично выполнять биомеханические движения. Координационные способности и функционирование опорно-двигательной системы человека играют огромную роль как в повседневной, так и в профессиональной деятельности.

Согласно данным эпидемиологических исследований, неврологические расстройства входят в тройку лидеров среди наиболее распространенных заболеваний в мире. Подавляющее большинство неврологических заболеваний характеризуются расстройством функций движения и равновесия. В мировой структуре заболеваемости особое место занимает ишемический инсульт (ИИ) головного мозга. Ишемический инсульт является главной причиной инвалидизации трудоспособного населения и лиц пожилого возраста [1]. Заболевание может сопровождаться двигательными, координаторными, сенсорными и когнитивными нарушениями, а также снижением способности выдерживать физическую нагрузку [2]. Парезы конечностей являются одним из наиболее изнурительных последствий инсульта и основным нарушением социальной и бытовой адаптации, лежащим в основе функциональной недееспособности после ИИ.

Реабилитация после инсульта направлена прежде всего на уменьшение двигательных нарушений. Эффект достигается посредством функциональной реорганизации головного мозга, когда в восстановлении утраченных двигательных функций участвуют незатронутые инсультом участки головного мозга. В основе этого эффекта лежит физиологический механизм – нейропластичность [3]. Восстановление контроля над паретичной рукой является одной из целей моторной реабилитации, позволяющей пациентам самостоятельно заниматься повседневной деятельностью, восстановить навыки самообслуживания [4].

Дополненная реальность (ДР) – технология, позволяющая создавать и ассоциировать виртуальный слой информации с каким-либо маркером, объектом в реальном мире при помощи компьютерных технологий [5]. Использование сенсорных стимулов, воссозданных при помощи системы дополненной реальности, играет роль дополнительного инструмента для моторной нейрореабилитации. С точки зрения безопасности для пациента, применение дополненной реальности более предпочтительно по сравнению с виртуаль-

ной реальностью. Это связано с тем, что человек, страдающий неврологическим заболеванием, не теряет контроль над окружающим пространством и легче переносит тренировку. Было проведено исследование, в котором сравнивалась скорость выполнения задач с учетом точности движений у группы здоровых добровольцев. При использовании устройства ввода с трехмерным позиционированием, чисто виртуальная среда (ВР) увеличивала время выполнения задачи в среднем на 22,5% по сравнению с дополненной реальностью. Также в условиях ДР у обследуемых наблюдалось более активное движение головы в процессе выполнения задач, что может свидетельствовать о более комфортной ориентации в пространстве [6]. Согласно выдвинутой нами гипотезе, эффективность нейрореабилитации во многом зависит от мотивации пациента и правильного выполнения упражнений, основанных на многократном повторении. В случае ДР точность и скорость выполнения задания напрямую влияют на оценку пациентом собственных возможностей. В этом случае достижение определенного результата мотивирует больного к дальнейшему выполнению заданий. Важным аспектом также является комфортная ориентация в окружающем пространстве без дополнительных стрессовых факторов, вызванных изоляцией зрительного анализатора, как это происходит в условиях ВР.

Целью настоящего исследования явилась разработка специализированного программного обеспечения (ПО), позволяющего воссоздавать контролируемую виртуальную среду с возможностью фиксации параметров движения человека для оценки и реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ИИ головного мозга.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для оценки влияния визуальных стимулов, воссозданных при помощи системы дополненной реальности на двигательную функцию, требовалось разработать ПО, включающее визуализацию данных на очках дополненной реальности Epsonmoveriobt-300 и обработку данных, получаемых с сенсоров захвата движений LeapMotion и MicrosoftKinect. Разработанный комплекс состоит из трех основных ПО (рис. 1):

1. ПО RehabAR предназначено для визуализации данных пациенту, устанавливается на операционную систему Android 5.1 очков дополненной реальности EpsonMoveriobt-300. ПО предназначено для формирования обратной связи, визуализации управляемой виртуальной сцены и подвижной модели пациента. В данном ПО ре-

ализовано четыре вида заданий для нейрореабилитации (рис. 2):

а) задание 1 – точность. Пациент выполняет задание в положении сидя. Сцена представлена кубиками двух цветов (красный и черный) с выборочной нумерацией. Пациент поочередно нажимает на кубики, выполняя разгибательные движения в плечевом и локтевом суставах. Каждый раз после нажатия пациент возвращает верхнюю конечность в исходное физиологичное положение. Упражнение предназначено для работы мышц плечевого пояса и верхней конечности, тренировки силы и точности движений. Задание может быть усложнено за счет добавления когнитивной тренировки – нажимать кубики по порядку согласно номеру;

б) задание 2 – статика. Пациент выполняет задание в положении сидя. Виртуальная сцена представляет собой окружность с вписанным в нее треугольником. При выполнении задания геометрические фигуры в результате взаимо-

действия с виртуальной моделью руки пациента меняют цвет с красного на зеленый. Больной проводит указательным и средним пальцами, сложенными вместе, по контуру окружности, затем по контуру треугольника по часовой стрелки и против нее. Упражнение имеет высокий уровень сложности прохождения, позволяет тренировать реципрокное взаимодействие мышц при статико-динамической нагрузке;

в) задание 3 – кисть. Пациент выполняет задание в положении сидя. Виртуальная сцена представлена пронумерованными шарами красных и черных цветов. Пациент поочередно совершает захват и сжатие шаров, сначала красных, затем черных. Упражнение предназначено для работы мышц кисти, развития функциональных возможностей пальцев рук, формирования правильного захвата. Задание может быть усложнено за счет добавления когнитивной тренировки – захват шаров согласно номеру на поверхности;

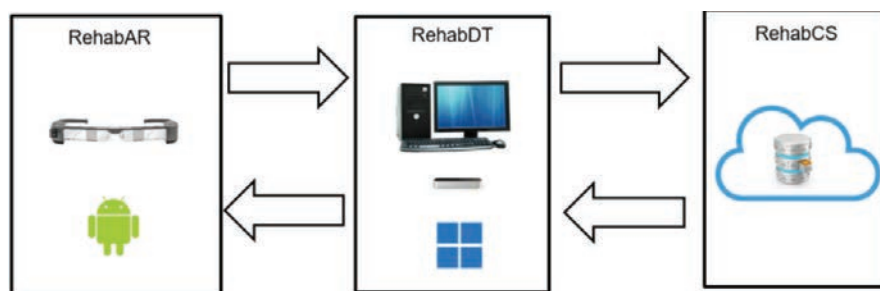


Рис. 1. Функциональная схема работы программного комплекса для оценки и реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ишемическим инсультом головного мозга

Fig. 1. Functional diagram of the software complex for assessment and rehabilitation of motor disorders in patients with ischemic stroke

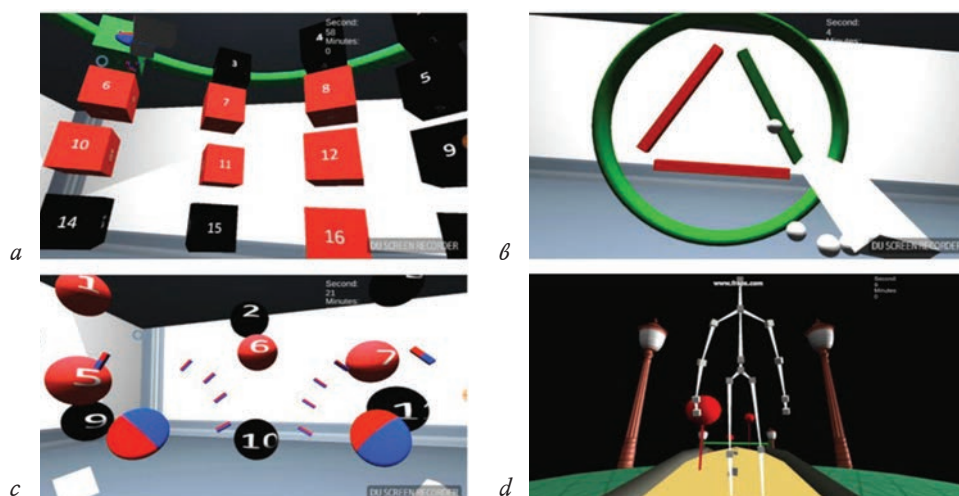


Рис. 2. Интерфейс визуализации данных для пациента, различные виды заданий: а – точность; б – статика; с – кисть; d – равновесие

Fig. 2. Data visualization interface for the patient, various types of tasks: a – accuracy; b – statics; c – fist; d – balance

г) задание 4 – равновесие. Пациент выполняет задания в положении стоя. Ходьба на месте, по виртуальной дороге, пациент время от времени выполняет шаг через препятствие и одновременно захватывает руками пролетающие мимо него объекты. Упражнение предназначено для формирования правильного навыка ходьбы, поддержания равновесия и преодоления препятствий при ходьбе.

2. ПО RehabDT – предназначено для контроля процесса реабилитации врачом, устанавливается на персональный компьютер с операционной системой Windows 10. ПО реализует ряд функций: прием данных о положении тела и конечностей от сенсоров безмаркерного видеозахвата; визуализацию компьютерной модели пациента; передачу по локальной сети данных о положении тела пациента на очки дополненной реальности; прием по локальной сети данных о взаимодействии пациента с виртуальными объектами; прием по локальной сети данных о положении головы пациента (по гироскопическим датчикам очков дополненной реальности); визуализацию виртуального окружения в виде сцены с объектами взаимодействия на персональном компьютере; запись файла с координатами движения пациента.

3. ПО RehabCS для хранения, подготовки и обработки данных захвата движений. Данное ПО реализовано как web-приложение, размещенное в локальной сети. С его помощью осуществима возможность структурированного хранения, разметки и автоматизированной обработки данных видеозахвата движений.

Для разработки метода оценки качества движений использовалась платформа RStudio 1.2.1335. В качестве критерия оценки применялись следующие критерии: общее количество завершенных движений (завершенное задание) за одну процедуру и максимальная длительность выполнения серии заданий за один подход без отдыха. В качестве критерия, характеризующего вариабельность движений при следовании заданной траектории, был предложен спектральный критерий. Для его расчета используется оконное разложение траектории движения в ряд Фурье. Размер окна преобразования определяется временем начала и окончания выполнения движения по заданной траектории. Вычисляется нормированное отношение мощности основной гармоники спектра к остальным гармоникам, который и рассматривается как характеристика точности следования основной траектории движения. Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием прикладного про-

граммного пакета R-system. Проверку на нормальность распределения признака определяли с помощью W-теста Шапиро – Уилка. Проводился описательный и сравнительный анализ. Ввиду ненормального распределения показателей описательный анализ включал определение квартилей. Сравнительный анализ для зависимых показателей основывался на определении достоверности их разницы по критерию Вилкоксона для парных случаев и по критерию Фридмана для множественного сравнения. Критический уровень значимости p при проверке статистических гипотез в исследовании принимался равным 0,05.

Исследование проводилось на базе кафедры неврологии и нейрохирургии, кафедры медицинской и биологической кибернетики СибГМУ в 2018–2019 гг. Размер выборки составил 59 пациентов с острым ишемическим инсультом головного мозга в бассейне средней мозговой артерии. Выраженность неврологического дефицита и функциональное состояние нервной системы оценивали с использованием международных клинических шкал, по данным электрофизиологического и нейровизуализационного исследования. Курс моторной реабилитации с применением технологии дополненной реальности составил 10 дней. Длительность одной тренировки – 60 мин.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С точки зрения оценки уровня взаимодействия мышц сгибателей и разгибателей верхней конечности наиболее информативным является задание «статика». Количественные характеристики, описывающие динамику изменения двигательной активности в процессе тренировки руки с парезом представлены в таблице.

Исходя из представленных данных, очевидно, что моторная нейрореабилитация у пациентов с парезами верхних конечностей методом дополненной реальности позволяет добиться улучшения двигательных навыков. Анализ точности движений показал, что по мере увеличения количества тренировок у пациентов увеличивается точность следования заданной траектории ($p = 0,032$). Выявлено достоверное увеличение количества завершенных движений с каждой последующей тренировкой ($p = 0,002$), что свидетельствует об увеличении скорости выполнения задания с течением времени реабилитации, а также о сокращении периода отдыха между выполняемыми подходами во время одной тренировки. Повышение физической выносливости подтверждает статистически значимое увеличение максимальной длительности выполнения серии заданий ($p = 0,012$)

при сравнительном анализе первой и десятой тренировок. На рис. 3 приведены примеры траектории движения при выполнении задания «ста-

тика» на 1- и 10-й день нейрореабилитации, которые показывают, что происходит увеличение длительности выполнения задания без отдыха.

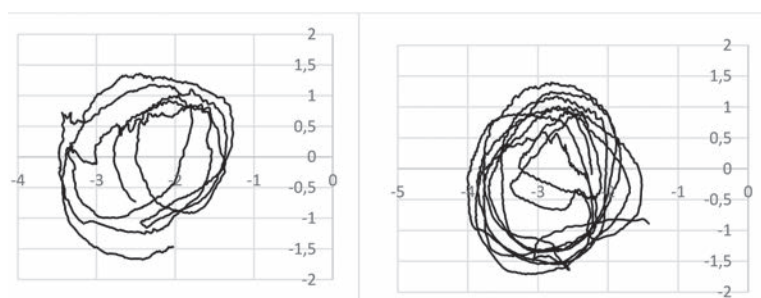


Рис. 3. Пример траектории движения руки с парезом в процессе выполнения задания «статика» на 1- и 10-й день тренировки (одно деление – один дециметр)

Fig. 3. An example of a trajectory of a hand with paresis in the process of completing the “statics” task on days 1 and 10 (one division – one decimeter)

Т а б л и ц а
Table

Вычисляемые параметры, отражающие динамику изменения двигательной активности в процессе тренировки руки с парезом, $Me [Q_1; Q_2]$									
Calculated parameters reflecting the dynamics of changes in motor activity when training the hand with paresis, $Me [Q_1; Q_2]$									
Параметр Parameter	1-й день Day 1	2-й день Day 2	3-й день Day 3	4-й день Day 4	5-й день Day 5	6-й день Day 6	8-й день Day 8	10-й день Day 10	p_{1-10}
Значение спектрального критерия Spectral criterion	0,94 [0,74; 0,96]	0,95 [0,7;0,97]	0,96 [0,88; 0,96]	0,96 [0,71; 0,97]	0,95 [0,94; 0,96]	0,95 [0,92; 0,96]	0,96 [0,93; 0,97]	0,96 [0,95; 0,97]	0,032
Количество завершённых движений Number of completed movements	23 [9; 30]	28 [12; 30]	34 [20; 38]	45 [39; 49]	46 [38; 52]	50 [39; 55]	53 [45; 58]	55 [34; 59]	0,002
Максимальная длительность выполнения серии заданий, с Maximum duration of a succession of tasks, sec	25 [10; 32]	27 [12; 30]	35 [19; 40]	38 [20; 44]	37 [22; 48]	43 [30; 49]	43 [33; 50]	45 [38; 68]	0,012

ВЫВОДЫ

В процессе выполнения настоящего исследования разработано специализированное ПО, позволяющее воссоздавать контролируемую виртуальную среду с возможностью фиксации параметров движения человека. Разработанное ПО применялось для оценки и реабилитации двигательных нарушений у пациентов с ИИ головного мозга и парезами верхних конечностей. По результатам исследования выявлено достоверное увеличение точности движений, а также увеличение выносливости, что свидетельствует об эффективности используемого подхода в процессе моторной нейрореабилитации.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Truelsen T., Piechowski-Jyżwiak B., Bonita R., Mathers C., Bogousslavsky J., Boysen G. Stroke incidence and prevalence in Europe: a review of available data. *Eur. J. Neurol.* 2006; 13 (6): 581–598. DOI: 10.1111/j.1468-1331.2006.01138.x.
2. Bleyenheuft Y., Gordon A.M. Precision grip in congenital

and acquired hemiparesis: similarities in impairments and implications for neurorehabilitation. *Front. Hum. Neurosci.* 2014; 8: 459. DOI: 10.3389/fnhum.2014.00459.

3. Richards L.G., Stewart K.C., Woodbury M.L., Senesac C., Cauraugh J.H. Movement-dependent stroke recovery: a systematic review and meta-analysis of TMS and fMRI evidence. *Neuropsychologia.* 2008; 46 (1): 3–11. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.08.013.
4. Pollock A., Farmer S.E., Brady M.C. et al. Interventions for improving upper limb function after stroke. *Cochrane Database Syst. Rev.* 2014; (11): CD010820. DOI: 10.1002/14651858.CD010820.pub2
5. Burke J., McNeill M., Charles D., Morrow P., Crosbie J., McDonough S. Augmented reality games for upper-limb stroke rehabilitation: 2010 Second International Conference on Games and Virtual Worlds for Serious Applications. Braga, Portugal: IEEE, 2010: 75–78. DOI: 10.1109/VIS-GAMES.2010.21.
6. Krichenbauer M., Yamamoto G., Taketom T., Sandor C., Kato H. Augmented reality versus virtual reality for 3D object manipulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics.* 2018; 24 (2): 1038–1048. DOI: 10.1109/TVCG.2017.2658570.

Вклад авторов

Толмачев И.В., Алифирова В.М., Казаков С.Д., Королева Е.С. – разработка программного обеспечения, анализ и интерпретация данных, обоснование рукописи и проверка критически важного содержания.

Сведения об авторах

Толмачев Иван Владиславович, канд. мед. наук, доцент, кафедра медицинской и биологической кибернетики, СибГМУ, г. Томск. ORCID iD 0000-0002-2888-5539.

Алифирова Валентина Михайловна, д-р мед. наук, профессор, зав. кафедрой неврологии и нейрохирургии, СибГМУ, г. Томск. ORCID iD 0000-0002-4140-3223.

Казаков Станислав Дмитриевич, ординатор, кафедра неврологии и нейрохирургии, СибГМУ, г. Томск. ORCID iD 0000-0001-9818-5549.

Королева Екатерина Сергеевна, канд. мед. наук, доцент, кафедра неврологии и нейрохирургии, СибГМУ, г. Томск. ORCID iD 0000-0003-1911-166X.

(✉) **Толмачев Иван Владиславович**, e-mail ivantolm@mail.ru.

Поступила в редакцию 10.10.2019
Подписана в печать 21.11.2019

Authors contribution

Tolmachev I.V., Alifirova V.M., Kazakov S.D., Koroleva E.S. – development of the software complex, analysis and interpretation of the data, justification of the manuscript and critical revision of the manuscript for important intellectual content.

Authors information

Tolmachev Ivan V., PhD, Associate Professor, Department of Medical and Biological Cybernetics, SSMU, Tomsk, Russian Federation. ORCID iD 0000-0002-2888-5539.

Alifirova Valentina M., DM, Professor, Head of Department of Neurology and Neurosurgery, SSMU, Tomsk, Russian Federation. ORCID iD 0000-0002-4140-3223.

Kazakov Stanislav D., Resident, Department of Neurology and Neurosurgery, SSMU, Tomsk, Russian Federation. ORCID iD 0000-0001-9818-5549.

Koroleva Ekaterina S., PhD, Associate Professor, Department of Neurology and Neurosurgery, SSMU, Tomsk, Russian Federation. ORCID iD 0000-0003-1911-166X.

(✉) **Tolmachev Ivan V.**, e-mail ivantolm@mail.ru.

Received 10.10.2019
Accepted 12.11.2019