

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ 3D-ПЕЧАТИ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЛОНГЕТ ДЛЯ ИМОБИЛИЗАЦИИ КИСТИ И ПРЕДПЛЕЧЬЯ ПРИ ТРАВМЕ

С. А. Пелешок¹, Д. А. Волов¹, М. В. Титова¹, М. И. Елисеева¹, В. Н. Адаменко¹, Я. И. Небылица²

¹ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, г. Санкт-Петербург, Россия

²Главное военно-медицинское управление Министерства обороны Российской Федерации на базе Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова, г. Санкт-Петербург, Россия

DEVELOPMENT OF 3D PRINTING TECHNIQUES INDIVIDUAL SPLINTS FOR BRUSH AND FOREARM IMMOBILIZATION WITH INJURY

S. A. Peleshok¹, D. A. Volov¹, M. V. Titova¹, M. I. Eliseeva¹, V. N. Adamenko¹, Ya. I. Nebylitsa²

¹S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, Saint Petersburg, Russia

²Main Military Medical Department of the Ministry of the Russian Defense Ministry on the base S. M. Kirov Military Medical Academy, Saint Petersburg, Russia

Резюме. 3D-печать (аддитивные технологии) в последние годы все чаще находят применение в медицине. Технология создания физических 3D-моделей с использованием данных поверхностного сканирования и/или анатомических изображений, выполненных при неинвазивных исследованиях (компьютерная томография, магнитно-резонансная томография), представляет собой многоэтапный процесс: получение изображения, создание цифровой модели, построение системы поддержек и разделение модели на слои, трехмерная печать и постобработка в зависимости от способа 3D-печати. 3D-печать индивидуальных лонгет невозможна без тесного сотрудничества между врачами и инженерами, так как находится на стыке двух этих специальностей. В статье освещены вопросы апробации методики получения цифровой модели и персонализированных лонгет, изготовленных с помощью 3D-печати, для лечения переломов костей и реабилитации у военнослужащих. Использование трехмерной печати для изготовления персонализированных медицинских изделий улучшит качество жизни пациентов (6 рис., 1 табл., библиография: 11 ист.).

Ключевые слова: аддитивные технологии, изделия медицинского назначения, лонгеты, предоперационные макеты, трехмерная печать, 3D-печать в медицине.

Статья поступила в редакцию 26.06.2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Использование гипса для лечения переломов костей, преимущественно конечностей, имеет давние традиции. Среди древних источников упоминание о его применении для обездвиживания конечностей и суставов можно найти в работах арабских врачей IX–XI вв. [1, 2]. В медицинской практике основными средствами иммобилизации являются: гипсовая повязка, или ее аналоги (из турбокаста, целлокаста и др.), либо ортезы серийного производства (например, из пластика, легких пород металлов) [3].

Методика наложения гипсовых повязок для лечения травм и неосложненных переломов конечностей, предложенная и внедренная еще в 1854 г. Н. И. Пиро-

Summary. 3D printing (additive technologies) in recent years is increasingly being used in medicine. The technology for creating physical 3D models from surface scan data and/or anatomical images of non-invasive studies (computed tomography, magnetic resonance imaging) is a multi-stage process: image acquisition, digital model creation, support system construction and separation the model into layers, three-dimensional printing and post-processing depending on the 3D printing method. 3D printing of individual splints not possible without close cooperation between doctors and engineers, as it is at the junction of two specialties. The article highlights the issues of testing the methodology for obtaining a digital model and personalized splints made with the help 3D printing for use in the treatment and rehabilitation of military personnel. Using 3D printing to make personalized medical products will improve the quality life patients (6 figs, 1 table, bibliography: 11 refs).

Key words: additive technologies, medical devices, preoperative layouts, splint, 3D-printing in medicine, three-dimensional printing.

Article received 26.06.2019.

говым, остается востребованной и на сегодняшний день [4]. Широко она стала применяться для догоспитальной помощи раненым во время Крымской войны (1853–1856 гг.). В настоящее время лечение с помощью гипсовой повязки совершенствовалось и применяется в клинической практике.

Гипсовая повязка имеет ряд преимуществ по сравнению с другими средствами иммобилизации: большой диапазон применения при травмах различного характера, низкая рыночная стоимость, простота в применении, малая травматичность в быту, наличие в любой медицинской организации [5].

Но есть и недостатки: гигроскопичность гипса; повязка со временем приобретает неэстетичный вид и становится ломкой; отсутствие возможности наблюдения и контроля за регенерацией структу-

ры кости на травмированном участке; отсутствие доступа для гигиенической помывки и нарушение их воздухообмена под повязкой с последующим шелушением рогового слоя кожи, что приводит к дискомфорту, зуду и иногда к формированию процессов воспаления с присоединением патогенной микрофлоры. При длительном ношении повязки могут возникать аллергические реакции, гнойничковые заболевания кожи [6]. Вес повязки в случае фиксации двух и более суставов зачастую бывает сопоставим с весом самой конечности, что вызывает ощутимый дискомфорт, особенно у пожилых пациентов и детей.

Развитие технологий и появление новых материалов для иммобилизации существенно расширили возможности оказания медицинской помощи при травмах [7]. Однако полимерные повязки хотя и лишены ряда недостатков свойственных гипсу, но обладают высокой рыночной стоимостью, а лонгеты серийного производства, выполненные из пластика и легких пород металлов, имеют особые показания к применению (жесткая фиксация) и не используются при большинстве переломов, особенно на ранних этапах лечения; кроме того, их размерная сетка установлена производителем без учета особенностей индивидуальной анатомии пациента [8].

С внедрением аддитивных технологий в медицину все чаще поднимается вопрос об их научно-практическом применении. Название метода послойного создания физической модели на основе ее цифрового изображения в отечественной и зарубежной литературе является синонимом терминов «трехмерная печать», «3D-печать», «быстрое прототипирование», «аддитивные технологии». Технологии трехмерной печати известны на протяжении последних 30 лет. Первые сообщения о них в научной литературе начали появляться в 80-х гг. прошлого столетия [9].

В России с 2013 г. производством носимых индивидуальных ортезов занимается ряд российских компаний. Их продукция изготавливается по индивидуальным меркам конечностей пациента (чаще верхних) на 3D-принтере по технологии FDM (fused deposition modeling, моделирование методом наплавления) и представляет собой полимерную пластину, которая после нагревания под действием температуры (более 60 °C) во время установки моделируется непосредственно на конечности больного. Остается открытым вопрос об изготовлении образцов, предусматривающих полное повторение поверхности кожи по всей конечности пациента, исключая ручное моделирование заготовки [9].

В 2017 г. в Инженерной школе Университета Дикина в Австралии начались исследования по

созданию индивидуальных лонгет. Ученым удалось получить экспериментальные прототипы с помощью аддитивных технологий. В настоящее время продолжается разработка образцов, но опытные модели еще не внедрены в медицинскую практику [11].

С учетом слабых сторон классических и современных методов лечения неосложненных переломов на базе научно-исследовательского центра Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова операторами научной роты № 8 Главного военно-медицинского управления Министерства обороны Российской Федерации совместно с операторами военного инновационного технополиса «ЭРА» в рамках научно-исследовательской работы о возможности применения технологии 3D-печати для создания средств иммобилизации при травмах и неосложненных переломах костей апробируются методики моделирования и изготовления опытных образцов индивидуальных лонгет.

По нашему мнению, индивидуально носимые лонгеты должны соответствовать следующим требованиям:

1. Иметь достаточную степень иммобилизации.
2. Уменьшать нагрузку на поврежденный участок.
3. Направлять или ограничивать движение.
4. Облегчать или снимать болевой синдром.
5. Обладать высокими прочностными характеристиками.
6. Быть изготовленными из гипоаллергенных материалов.
7. Обеспечивать доступ к ежедневной личной гигиене.
8. Производиться за относительно короткий промежуток времени.
9. Создавать возможность моделирования в момент иммобилизации, а также последующей коррекции по мере разрешения отека.

ЦЕЛЬ

Апробация методики создания цифровой модели и 3D-печати индивидуальных лонгет при травмах и неосложненных переломах костей кисти и предплечья с использованием аддитивных технологий на примере лучезапястного сустава.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для отработки методики моделирования лонгеты лучезапястного сустава выполняли сканиро-



Рис. 1. Процесс сканирования

вание левой верхней конечности добровольца в возрасте 46 лет (рис. 1).

В качестве неинвазивного исследования применяли оптический 3D-сканер Artec Spider (Artec 3D, Люксембург) с точностью измерений 0,05 мм. Обработка данных осуществлялась на персональном компьютере под управлением операционной системы Windows 7 Pro SP1 (64x) с процессором Intel Core I7 6700U (3,4 ГГц), объемом оперативной памяти 32 Гб, видеокартой Nvidia GeForce GTX 1060 (6 Гб). На первоначальном этапе производилось снятие серии трехмерных снимков с руки пациента (рис. 2).

За несколько проходов по области интереса формировалось облако точек в пространстве. В программном обеспечении (ПО) Artec Studio 12 (Artec 3D, Люксембург) выполнялись операции склейки снимков, удаления шумов и сглаживания, формирования высокополигональной модели в общепринятом трехмерном формате OBJ (*.obj). На ее основе в ПО для 3D-моделирования, таком как Autodesk 3Ds Max, Solid works, ZBrush, Blender и др., проектируется конечная модель лонгеты. Нами в качестве ПО использовалось Geomagic Freeform Plus (3D Systems, США). На поверхности загруженной в программу модели руки формировался рабочий слой толщиной 5 мм (рис. 3).

На теле поверхности в необходимом месте моделировались гигиенические отверстия (рис. 4). Полученный объект сохранялся в формате STL (*.stl) и на цифровом носителе переносился на 3D-принтер для печати.

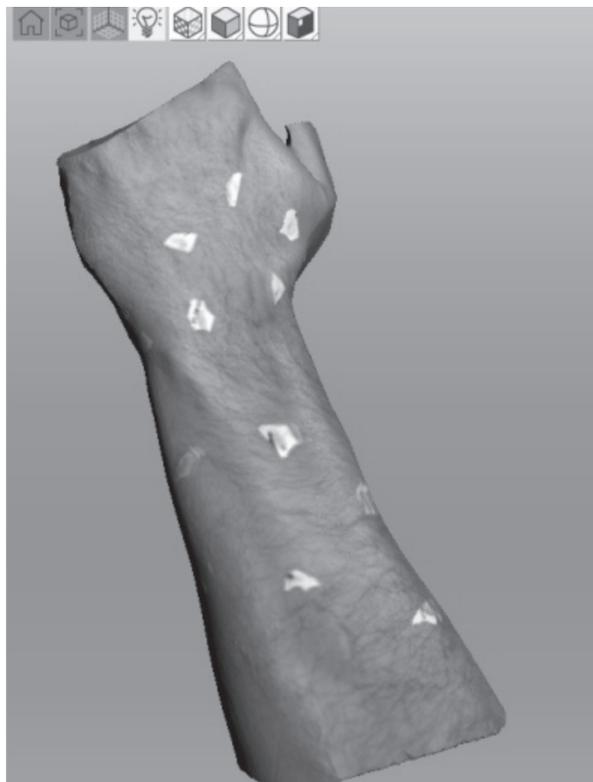


Рис. 2. Моделирование верхней конечности в программе Artec Studio 12

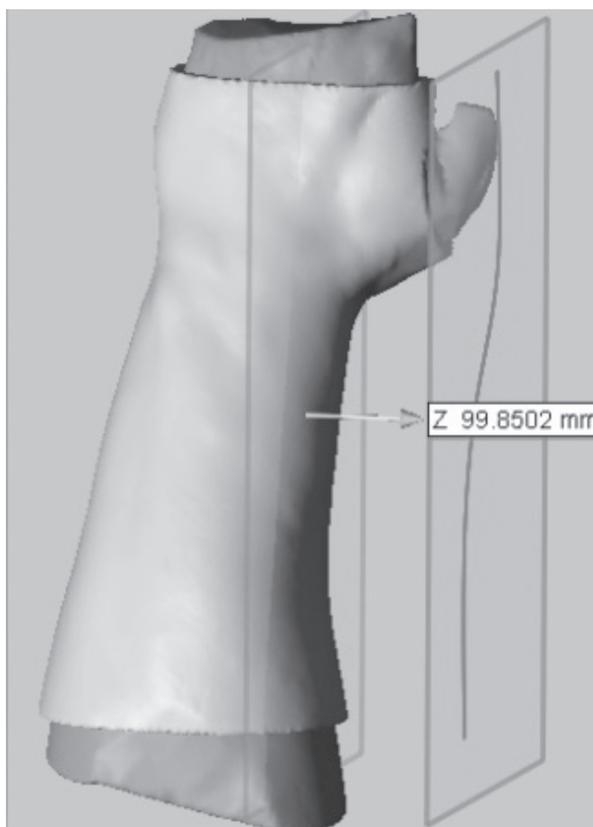


Рис. 3. Формирование рабочего слоя в программе Geomagic Freeform Plus



Рис. 4. Моделирование отверстий в программе Geomagic Freeform Plus

Подготовка настроек печати выполнялась в ПО (слайсере) Cura 4.0 (*Ultimaker*, Нидерланды) со следующими параметрами: ориентация модели на поле печати вертикальная; ширина экструзии 1 мм; высота слоя 0,8 мм; 100% заполнение; скорость печати 25 мм/с; температура сопла 230 °С; температура стола 60 °С (рис. 5). Сформированное задание в формате G-CODE (*.gcode) выполнялось на 3D-принтере. Активного участия оператора в процессе печати не требовалось. Печать изделий производилась на 3D-принтере FDM, с классической (декартовой) механикой, Ender 3 (*Creativity*, КНР), соплом 1,0 мм, пластиком PLA (полилактид) телесного цвета производителя REC (ООО «РЭК», Россия). После печати конструктивные поддержки удалялись механическим способом.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Время сканирования составило 10 мин, моделирования и обработки данных — до 30 мин, изготов-



Рис. 5. Подготовка модели к печати в программе Cura 4.0

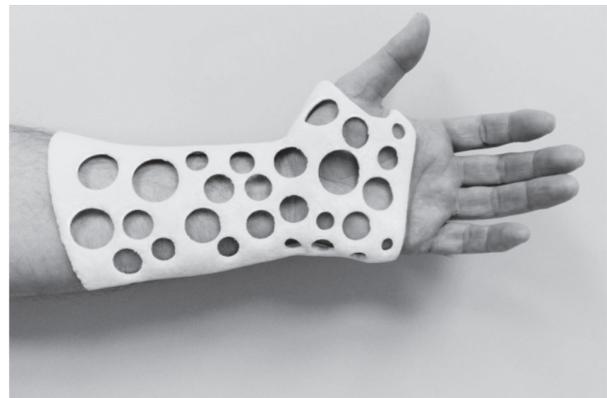


Рис. 6. Индивидуальная лонгета в области левого лучезапястного сустава

ления лонгеты на принтере — 240 мин, наложения лонгеты — менее 5 мин. Общее время производства составило 285 мин.

Изделие было готово к наложению сразу после производства. Поверхность лонгеты гладкая. Так как модель изготавливалась с вертикальной ориентацией, укладка слоев ровная, слабо различимая. Образец плотно, без зазоров, прилегал к запястью, как продемонстрировано на рис. 6.

Крепится лонгета к конечности с помощью текстильных застежек-лент. Запястье жестко фиксируется. Так как конструкция облегчена гигиеническими отверстиями, обеспечивается естественная вентиляция кожных покровов. Предполагается, что такое решение облегчит выздоровление у пациентов, на местах травм которых присутствуют кож-

Характеристики средств иммобилизации травм лучезапястного сустава [2, 3, 6]

Средство иммобилизации	Вес, г	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Время наложения, мин	Рыночная стоимость, руб.	Время изготовления, мин
Лонгета, изготовленная с помощью 3D-печати (PLA REC)	255	>50	>55	<5	>400	240
Гипсовая повязка	>1000	>5	>2,5	>15	>100	15
Повязки из полимерных материалов (турбокаст, целлокаст и др.)	>200	>50	>50	>15	>2500	15
Ортезы серийного производства	>300	–	–	>5	>1500	0

ные заболевания, поскольку материал изделия — PLA — гипоаллергенен и не является источником кожных реакций. Во время ношения лонгеты пациентом допускается контакт с водой, что облегчает жизнедеятельность в быту и соблюдение личной гигиены. Материал рентгенпозитивен, поэтому для контроля состояния конечности конструкцию снимать не нужно.

В оптическом типе сканера, который мы использовали, отсутствует лазер, что делает его полностью безопасным для исследования людей. Предполагается, что лонгеты, изготовленные по такой методике, могут использоваться не только при переломах, но и при травмах различного характера (растяжениях, разрывах связок и др.). Сравнение основных характеристик средств иммобилизации лучезапястного сустава приведено в табл. 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

3D-печать индивидуальных лонгет невозможна без тесного сотрудничества врачей и инженеров, так как находится на стыке этих двух специальностей. Использование трехмерной печати для изготовления лонгет для верхней конечности (кисти и предплечья) имеет по меньшей мере те же или в некоторых отношениях даже лучшие характеристики

применения по сравнению с традиционными методами. Наши результаты подтвердили техническую возможность создания индивидуальных лонгет для верхней конечности, поскольку они имеют достаточные для этой цели физико-механические свойства, меньший вес по сравнению с другими средствами иммобилизации; решают проблему комфорта и личной гигиены в процессе лечения после спада отека и образования костной мозоли и, несомненно, улучшат качество жизни.

Таким образом, средства иммобилизации, изготовленные с применением аддитивных технологий, соответствуют заявленным требованиям, в том числе есть возможность моделирования изготовленного изделия по мере разрешения отека с помощью текстильных застежек-лент, имеется также возможность заранее спроектировать на модели будущего изделия необходимые крепежи для установления смягчающих элементов в зонах костных выступов, которые в процессе эксплуатации могут быть заменены (что в случае гипсовой иммобилизации затруднительно). Однако необходимо проведение последующих исследований по возможности применения 3D-печати при оказании неотложной помощи. Внедрение в клиническую практику аддитивных технологий для печати лонгет при лечении переломов и реабилитации военнослужащих требует дальнейших исследований и разработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. *Strukov V. I., Prokhorov M. D., Elistratov D. G.* A method of reducing the time of immobilization in bone fractures. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2013; 9: 124–6. Russian (*Струкров В. И., Прохоров М. Д., Елистратов Д. Г.* Способ уменьшения сроков иммобилизации при переломах костей. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2013; 9: 124–6).
2. *Zeman M.* Technique for applying dressings. Saint Petersburg: Piter Publisher; 1994. 208. Russian (*Земан М.* Техника наложения повязок. СПб.: Питер; 1994. 208).
3. *Thomas D.* Metal frame mobilisation orthoses for wrist and elbow. *Orthopaedic genius*. 2016; 1: 28–39. Russian (*Томас Д.* Металлические каркасные мобилизационные ортезы для лучезапястного и локтевого суставов. *Гений ортопедии*. 2016; 1: 28–39).
4. *Pivatova S. S., Khinevich V. R.* The role of Pirogov during the Crimean War. In: *Materialy I studencheskoy nauchno-teoreticheskoy konferentsii «Aktual'naya meditsina»* (Materials of the I student scientific-theoretical conference "Actual Medicine"). Simferopol; 2018: 520–23. Russian (*Пиватова С. С., Хиневиц В. Р.* Роль Пирогова в период Крымской войны. *Материалы I студенческой научно-теоретической конференции «Актуальная медицина»*. Симферополь; 2018: 520–23).
5. *Kaplan A. V.* Damage to bones and joints. Moscow: Meditsina Publisher; 1979. 568. Russian (*Каплан А. В.* Повреждения костей и суставов. М.: Медицина; 1979. 568).
6. *Sverbynenko L. P., Voloshyna N. V., Valdanova N. A., Shvareva T. I., Romanenko I. M.* Skin manifestations caused by non-adequate local therapy. *Ukrainian med. almanac*. 2012; 15 (3): 181–2. Russian (*Свербиненко Л. П., Волошина Н. В., Вальданова Н. А., Шварева Т. И., Романенко И. М.* Кожные поражения, обусловленные неадекватной местной терапией. *Украинский мед. альманах*. 2012; 15 (3): 181–2).
7. *Rushay A. K., Klimovitsky F. V., Lisunov S. V., Solonitsin E. A.* Possible ways to improving results of conservative treatment of patients with fracture of distal metaepiphysis of radius. *Medical alphabet*. 2016; 18 (2): 46–8. Russian (*Рушай А. К., Климовицкий Ф. В., Лисунов С. В., Солоницын Е. А.* Возможные пути улучшения результатов консервативного лечения больных с переломом дистального метаэпифиза лучевой кости. *Медицинский алфавит*. 2016; 18 (2): 46–8).
8. *McDaid C., Fayer D., Booth A., O'Connor J., Rodriguez-Lopez R., McCaughan D., Bowers R., Iglesias C. P., Lalor S., O'Connor R. J., Phillips M., Ramdharry G.* Systematic review of the evidence on orthotic devices for the management of knee instability related to neuromuscular and central nervous system disorders. *BMJ Open*. 2017; 9 (7): e015927. DOI: 10.1136/bmjopen-2017-015927
9. *Nagibovich O. A., Svistov D. V., Peleshok S. A., Korovin A. E., Gorodkov E. V.* Application of 3D-printing technology in medicine. *Clin. Pathophysiol*. 2017; 3: 14–22. Russian (*Нагибович О. А., Свистов Д. В., Пелешок С. А., Коровин А. Е., Городков Е. В.* Применение технологии 3D-печати в медицине. *Клин. патофизиол*. 2017; 3: 14–22).
10. *Gorbatov R. O., Kazakov A. A.* Development of technology of creation of individual orthoses for the immobilization of joints of the top extremity by means of the 3D press. *Bull. of Volgograd state med. university*. 2018; 3 (67): 124–28. Russian (*Горбатов Р. О., Казаков А. А.* Разработка технологии создания индивидуальных ортезов для иммобилизации суставов верхней конечности с помощью 3D-печати. *Вестн. Волгоградского государственного мед. университета*. 2018; 3 (67): 124–28).
11. *Fitzpatrick A. P., Mohammed M. I., Collins P. K., Gibson I.* Design of a patient specific, 3D printed arm cast. *KnE Engineering*. 2017: 135–42.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пелешок Степан Андреевич — докт. мед. наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6, конт. тел.: +7(911)2118173, e-mail: peleshokvma@mail.ru

Волов Даниил Александрович — врач травматолог-ортопед клиники (кафедры) военной травматологии и ортопедии, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6, конт. тел.: +7(931)2137297, e-mail: volovdaniil@yandex.ru

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Peleshok Stepan A. — M. D., D. Sc. (Medicine), Prof., Leading researcher, Science Research Center, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044, cont. phone: +7(911)2118173, e-mail: peleshokvma@mail.ru

Volov Daniil A. — orthopedic surgeon, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044, cont. phone: +7(931)2137297, e-mail: volovdaniil@yandex.ru

BIOMEDICAL RESEARCH

Титова Мария Владимировна — канд. хим. наук, научный сотрудник НИО (медико-биологических исследований) научно-исследовательского центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6, конт. тел.: +7(921)8899314, e-mail: titovamaryv@mail.ru

Елисеева Марина Ивановна — младший научный сотрудник НИО (медико-биологических исследований) научно-исследовательского центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6, конт. тел.: +7(911)9699132, e-mail: eliceewa@yandex.ru

Адаменко Валерий Николаевич — старший научный сотрудник научно-исследовательского центра, ФГБВОУ ВО «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» МО РФ, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6, конт. тел.: +7 (921)5513600, e-mail: adavalnik@mail.ru

Небылица Ярослав Игоревич — оператор 8-й научной роты, Главное военно-медицинское управление Министерства обороны Российской Федерации на базе Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова, 194044, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 37, к. 2

Titova Maria V. — Ph. D. (Chemistry), Researcher, Biomedical department, Science Research Center, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044, cont. phone: +7(921)8899314, e-mail: titovamaryv@mail.ru

Eliseeva Marina I. — junior researcher, Biomedical department, Science Research Center, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044, cont. phone: +7(911)9699132, e-mail: eliceewa@yandex.ru

Adamenko Valeriy N. — senior researcher Scientific Research Center, S. M. Kirov Military Medical Academy of the Russian Defense Ministry, 6, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044, cont. phone: +7(921)5513600, e-mail: adavalnik@mail.ru

Nebylitsa Yaroslav I. — operator 8th research company, Main Military Medical Department of the Ministry of the Russian Defense Ministry on the base S. M. Kirov Military Medical Academy, bld. 37-2, Akademika Lebedeva str., Saint Petersburg, Russia, 194044