

УДК 60; 620.3; 007.52

MSC 92C75; 93C85; 92-10

DOI: 10.35330/1991-6639-2020-6-98-7-13

ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ БИОНАНОРОБОТОТЕХНИКИ НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ РАЗВИТИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ. НЕОБХОДИМОСТЬ И ВОЗМОЖНОСТЬ МОДЕРНИЗАЦИИ БИОНАНОРОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО БИОПРОИЗВОДСТВА

Р.Н. АБУТАЛИПОВ, А.У. ЗАММОЕВ

Институт информатики и проблем регионального управления –
филиал ФГБНУ «Федеральный научный центр
«Кабардино-Балкарский научный центр Российской академии наук»
360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а
E-mail: iipru@rambler.ru

После преодоления клеточного барьера и появления «тканевых чипов» и многоклеточных инженерных живых систем цели и задачи молекулярного производства изменились, и эти изменения потребовали изменений для бионаноробототехники, потому что бионаноробототехника ориентирована на автоматизированное молекулярное производство.

Ключевые слова: серийное молекулярное производство, биоинтеграция, «тканевые чипы», «органы-на-чипе», M-CELS, конвергенция, дивергенция, biofabrication, biomanufacturing, living system, life form, молекулярные биомашинны, биоинтегрированные технологии, мягкая робототехника.

Бионаноробототехника (БНРТ) актуальна с 2012 года, когда ОНИТ РАН на специальной сессии установил перспективность автоматизации молекулярного производства для создания отечественных систем на кристалле (СнК). Автоматизация молекулярного производства требует изучения закономерностей и техники молекулярных машин живой природы для проектирования бионанороботов как молекулярных машин с автоуправлением [1]. С преодолением клеточного барьера и появлением основанных на клеточных конструкциях материалов («тканевых чипов» и «многоклеточных инженерных конструкций») [2] стало возможным использование в технологических схемах и процессах инженерно-технических конструкций на основе тканей и клеток, функциональная специализация которых позволяет серийное молекулярное производство. Обновление (update) молекулярного производства делает актуальным вопрос модернизации БНРТ (концепции, области, задач, методов), ранее ориентированных на элементную базу наномехатроники для автоматизированного молекулярного производства отечественных СнК.

Рассмотрение развивающейся области биопроизводства M-CELS, «многоклеточных инженерных живых систем», которые состоят из взаимодействующих популяций клеток, приводит нас к выводу о возможности модернизации одной из основных задач БНРТ – осуществление для конкретной технической системы сходства бионаномашин с наномехатронными устройствами, ограниченными спецификой условий бионаносреды.

В биопроизводстве происходит дивергенция biofabrication и bimanufacturing, где biomanufacturing означает сборку, а tissue engineering, то есть «тканевые чипы», – это биофабрикация, как трехмерная биопечать. С появлением и распространением тканевой инженерии (tissue engineering) и регенеративной медицины, ставших основными областями ее применения, биофабрика (biofabrication) определяется как «автоматизированное производство биологически функциональных продуктов со структурной организацией из живых клеток, биоактивных молекул, биоматериалов, клеточных агрегатов, таких как микроткани или гибридные

конструкции клеточного материала, посредством биопечати или биоасSEMBЛИРОВАНИЯ и последующих процессов созревания тканей» [3]. Biomanufacturing представляет NCBI – NATIONAL CENTER BIOTECHNOLOGY INFORMATION (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov>), национальный ресурс по молекулярной биологии, миссия которого заключается в разработке новых информационных технологий, помогающих в понимании фундаментальных молекулярных и генетических процессов, контролирующих здоровье и болезни. Современные тенденции biomanufacturing сосредоточены на проектировании, изготовлении, сборке, измерении биоэлементов в структурах, устройствах и системах [4, 5].

Биопроизводство (biomanufacturing) M-CELS требует «биосборочной» линии для сборки из клеток функциональных единиц. Биофабрикация субъединиц и их дальнейшая сборка в M-CELS требует производственных технологий в нескольких дисциплинах, таких как визуализация, вычислительный анализ, микрофлюидика и других [2]. Здесь и возникает расширение задачи БНРТ по осуществлению сходства бионаномашин для конкретной технической системы с наномехатронными устройствами. Прежде всего новые биоинтегрированные технологии требуют улучшенного контроля качества клеток и неинвазивного мониторинга в реальном времени для механистических элементов M-CELS производства. Такие задачи в БНРТ решает специализированная система управления – когнитивная информационно-коммуникационная система (КИКС) [6]. Задача обеспечения сходства поведения биомашин с поведением наномехатронных устройств для молекулярного производства [7, 8] выполняется познавательным моделированием исследовательских данных, получаемых интеграцией подсистемы сенсоров и исполнительных устройств нижнего уровня, которая технически позволяет КИКС взаимодействовать с объектами исследуемых бионаносистем. Познавательное моделирование относится к области инфокогнитивных технологий [7], и это создает для БНРТ новую задачу поиска и исследования методов проектирования физической структуры и поведения молекулярных биомашин. Один из таких методов – масштабируемый конвейер для проектирования реконфигурируемых организмов, представляющий масштабируемый подход к проектированию живых систем с использованием эволюционного алгоритма, – представлен в работе [9].

Еще одна новая область исследований, открываемая для БНРТ биоинтегрированными технологиями, – это проблема невозможности открытия новых форм жизни автоматическим проектированием из-за непредсказуемости поведения произвольной биологической конструкции [2, 9, 10]. Решение этой проблемы требует сочетания непредсказуемости и контролируемости для серийного производства материалов нового типа: конструкций на основе тканей и клеток, таких как «тканевые чипы» и M-CELS. В БНРТ такая проблема получила название «проблемы постановки проблемы» [11-14]. У БНРТ есть для этого междисциплинарная система интегрирования технической информации в когнитивную стратегию функционального единства в техпроцессе [7]. Одним из направлений модернизации БНРТ может стать проверка возможности использовать для решения проблемы автоматического проектирования и конструирования развиваемую нами для построения когнитивной стратегии методике междисциплинарной системы интегрирования технической информации (МДСИТИ). Устройства и конструкции, детали и системы соединяет функциональное единство в технологическом процессе, процессе молекулярного производства. Когнитивная стратегия – это формулировка вектора процесса. Когнитивная стратегия разрабатывается как логическая задача, как граф когнитивной карты, как диаграмма функциональной модели, как база знаний репозитория [15]. В нашем исследовательском проекте было построено несколько таких задающих процесс векторов – когнитивных стратегий. Первый из них – это вектор техпроцесса, процесса автоматизированного молекулярного производства. Это базовый универсальный технологический цикл (БУТЦ) [16]. Другой вектор, другая когнитивная стратегия – это управляющая БУТЦ КИКС, ее базовый аналитический сервис (БИАС) и функциональная модель управления базой знаний ЛСД ЛАД (логическая структура данных леса доменов AD) [6, 8]. Опираясь на полученный в нашем исследовательском проекте опыт, мы разработали междисциплинарную систему интегрирования технологий (МДСИТИ), позволившую нам

преодолеть возникший на пути к третьему вектору барьер «проблемы постановки проблемы», после чего мы вышли на новый – прикладной – уровень нашего исследования [15, 17].

Биоинтегрированный подход к мягкой робототехнике может позволить реализовать биологические машины с возможностью взаимодействия с окружающей средой и другими живыми системами. Сочетание биологических компонентов, таких как клетки и ткани, с мягкой робототехникой может позволить создавать молекулярные биомашин, способные воспринимать, обрабатывать сигналы и производить усилие. Мягкие роботизированные устройства на основе клеток могут оказать преобразующее воздействие в области проектирования машин и систем, которые способны динамически воспринимать и реагировать на целый ряд сложных сигналов окружающей среды, что представляет значительный прогресс в направлении высокоуровневого функционального контроля над мягкими биороботическими системами [18]. Сложность конструирования молекулярных биомашин из естественных клеточных элементов как деформируемых объектов состоит в том, что из-за большого конфигурационного пространства и сложности точного моделирования поведения объекта традиционное моделирование становится очень трудоемким и требует обработки слишком большого объема данных. Методы *sim-to-real* (*s2r*) – преобразования симуляции в реальность – дают возможность научиться моделированию с рандомизацией для последующей вещественной реализации выработанного прототипа [19]. Используя методы и приемы симуляции, эволюционного моделирования и технологии преобразования симуляции в реальность (*sim-to-real*), можно модернизировать КИКС, разработав технику проектирования и прототипирования мягких роботизированных конструкций на основе клеток. Задача разработки такой техники – это еще одна задача обновления БНРТ.

Нанопроизводство, основанное на применении БНРТС, использует базовый универсальный технологический цикл (БУТЦ), состоящий из 5 фаз, третья из которых – «наномашинный конвейер» – реализует собственно нанопроизводство [16]. Представленный в работе [9] масштабируемый конвейер для создания перенастраиваемых (реконфигурируемых) вычислительно разрабатываемых организмов (CDO – computer designed organisms) обладает основательным сходством с БУТЦ (см. в этом же номере другую нашу работу) и может с учетом тех изменений, которые требует от БНРТ биоинтеграция, использоваться в наших исследованиях.

После преодоления клеточного барьера и появления «тканевых чипов» и многоклеточных инженерных живых систем цели и задачи молекулярного производства изменились, и эти изменения потребовали изменений для БНРТ, потому что БНРТ ориентирована на автоматизированное молекулярное производство.

Произведенные во втором десятилетии 21 века технологические прорывы в биологии органоидов, анализах «орган-на-чипе» и трехмерной биопечати, в результате которых стало возможным получать и дифференцировать индуцированные плюрипотентные стволовые клетки, сделали актуальными задачи проектирования, сборки и производства живых систем с широким спектром потенциальных применений. За последние несколько десятилетий биоинженеры, биофизики и биологи добились устойчивого прогресса в создании «многоклеточных инженерных живых систем» (M-CELS). Системы M-CELS состоят из живых клеток и тканей, организованных таким образом, что они создают новые функциональные возможности. Важная отличительная особенность этих систем то, что они спроектированы так, чтобы обладать определенной формой и функцией по своей конструкции, чтобы работать способами, которые сегодня не встречаются в естественных системах. Системы M-CELS могут производиться в большом количестве и достаточно надежным образом, что делает их надежными и доступными для серийного производства [2].

Ранее [20-23] мы уже писали о возможных перспективах таких систем, и теперь настало время оценить значение биоинтегрированных технологий для БНРТ.

Новые задачи БНРТ: модернизация КИКС для подсистемы сенсоров и исполнительных устройств нижнего уровня; поиск и исследование методов проектирования физической структуры и прогнозирования поведения молекулярных биомашин; междисциплинарная система

интегрирования технической информации в когнитивную стратегию функционального единства в техпроцессе; биоинтегрированный подход к мягкой робототехнике для реализации биологических машин с возможностью взаимодействия с окружающей средой и другими живыми системами; исследование методов s2g для моделирования с рандомизацией для последующей вещественной реализации выработанного прототипа; разработка техники для моделирования, проектирования и прототипирования мягких роботизированных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Раткин Л.С.* Нанотехнологические школы России: этапы становления и международная кооперация // Нано- и микросистемная техника. 2012. № 4 (141). С. 15-20.
2. *Kamm R.D. et al.* Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems // APL bioengineering. 2018. Vol. 2. №. 4. P. 040901.
3. *Tyrrell James.* How do you define biofabrication today? [Электронный ресурс] <https://physicsworld.com/a/how-do-you-define-biofabrication-today>. 27.02.2018
4. *Fatehullah A., Tan S. H., Barker N.* Organoids as an in vitro model of human development and disease // Nature cell biology. 2016. Vol. 18. № 3. Pp. 246-254.
5. *Friston K. et al.* Knowing one's place: a free-energy approach to pattern regulation // Journal of the Royal Society Interface. 2015. Vol. 12. № 105. P. 20141383.
6. *Абуталипов Р.Н., Заммиев А.У.* Поиск, исследование и развитие технологий бионаноробототехники для устойчивого развития горных территорий в эпоху шестого технологического уклада // Устойчивое развитие горных территорий. 2018. Т. 10. № 3(37). С. 447-457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457.
7. *Абуталипов Р.Н., Заммиев А.У., Загазежева О.З.* Интеррепрезентативные сети (ИРС) и репрезентативность VR визуализации наноструктур и процессов в наносреде // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 4 (72). С. 5-9.
8. *Абуталипов Р.Н., Заммиев А.У.* Доменная модель когнитивной инфокоммуникационной системы для интеллектуального медицинского онлайн-сервиса на базе бионаносенсорных устройств // Славянский форум. 2018. № 1. С. 104-113.
9. *Kriegman S. et al.* A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. № 4. Pp. 1853-1859.
10. *Macklin D.N., Ruggero N.A., Covert M.W.* The future of whole-cell modeling // Current opinion in biotechnology. 2014. Vol. 28. Pp. 111-115.
11. *Аршинов В.И.* Конвергентные технологии в контексте постнеклассической парадигмы сложности // Сложность. Разум. Постнеклассика. 2015. № 3. С. 42-54. DOI: 10.12737/13564.
12. *Аршинов В.И., Буданов В.Г.* Квантово-сложностная парадигма. Междисциплинарный контекст. Курск: Университетская книга. 2015. 121 с.
13. *Князева Е.Н.* Трансдисциплинарные стратегии исследований // Вестник ТПГУ. 2011. № 10(112). С. 193-201.
14. *Пригожин И., Стенгерс И.* Порядок из хаоса: новый диалог человека с природой. Пер. с англ. М.: Прогресс. 1986. 432 с.
15. *Абуталипов Р. Н., Заммиев А.У.* Актуальные методологические проблемы междисциплинарных исследований в области бионаноробототехники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 6(92). С. 10-20.
16. *Абуталипов Р.Н., Заммиев А.У., Нагоев З.В.* Бионаноробототехника: концептуализация, проблематика и задачи исследований // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 6(74). С. 11-17.
17. *Абуталипов Р.Н., Заммиев А.У.* Аспекты проблемы регионального управления и координации высокотехнологичных проектов // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2019. № 6(92). С. 60-66.

18. *Cvetkovic C. et al.* Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014. Vol.111. № 28. p. 10125-10130.
19. *Matas J., James S., Davison A.J.* Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation. [Электронный ресурс]. URL: arXiv preprint arXiv:1806.07851. 2018.
20. *Абуталипов Р.Н., Заммоев А.У., Денисенко В.А.* Выбор биологического наноструктурного объекта для исследования его свойств с точки зрения парадигмы мехатроники // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 6(74). С. 30-37.
21. *Абуталипов Р.Н., Заммоев А.У., Анчѣков М.Ю.* Перспективы применения микро- и наносистемной техники в биологии и медицинской диагностике. Проблемы и задачи ЛОС (лабораторий на чипе) // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2016. № 6 (74). С. 5-10.
22. *Абуталипов Р.Н., Заммоев А.У.* Перспективы применения магнитосом на нижнем уровне физического домена когнитивной инфокоммуникационной системы медицинского онлайн-сервиса на базе бионаносервисных устройств // Материалы второй Международной научной конференции «Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем». 2018. С. 201-205.
23. *Заммоев А.У., Абуталипов Р.Н.* Каталитические самоходные нанодвижители как основа элементной базы для проектирования наномехатронных устройств и систем для бионаномашин в бионаноробототехнике // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2018. № 6-2(86). С. 149-156.

REFERENCES

1. *Ratkin L.S.* *Nanotekhnologicheskie shkoly Rossii: etapy stanovleniya i mezhdunarodnaya kooperatsiya* [Russian nanotechnology schools: stages of formation and international cooperation] // Nano- and microsystem technology. 2012. № 4 (141). С. 15-20.
2. *Kamm R.D. et al.* Perspective: The promise of multi-cellular engineered living systems APL bioengineering. 2018. Vol. 2. №. 4. P. 040901.
3. *Tyrrell James.* How do you define biofabrication today? [Электронный ресурс] <https://physicsworld.com/a/how-do-you-define-biofabrication-today>. 27.02.2018
4. *Fatehullah A., Tan S.H., Barker N.* Organoids as an in vitro model of human development and disease // Nature cell biology. 2016. Vol. 18. № 3. Pp. 246-254.
5. *Friston K. et al.* Knowing one's place: a free-energy approach to pattern regulation // Journal of the Royal Society Interface. 2015. Vol.12. № 105. P. 20141383.
6. *Abutalipov R.N., Zammoev A.U.* *Poisk, issledovanie i razvitie tekhnologii bionanorobototekhniki dlya ustoychivogo razvitiya gornyykh territoriy v epokhu shestogo tekhnologicheskogo uklada* [Search, research and development of bionanorobotics technologies for the sustainable development of mountain territories in the new techno-economic paradigm] // *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territoriy* [Sustainable development of mountain territories]. 2018. Т. 10. № 3(37). Pp. 447-457. DOI: 10.21177/1998-4502-2018-3-447-457.
7. *Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Zagazezheva O.Z.* *Interrepresentativnyye seti (IRS) i representativnost' VR vizualizatsii nanostruktur i protsessov v nanosrede* [Interrepresentative network (IRN) and representativeness VR visualization of nanostructures and processes in nanomedium] // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2016. № 4 (72). Pp. 5-9.
8. *Abutalipov R.N., Zammoev A.U.* *Domennaya model' kognitivnoy infokommunikatsionnoy sistemy dlya intellektual'nogo meditsinskogo onlayn-servisa na baze bionanosensornyykh ustroystv* [Cognitive infocommunication system domain model for intelligent medical online service based on biosensor devices] // Slavic Forum. 2018. № 1. Pp. 104-113.
9. *Kriegman S. et al.* A scalable pipeline for designing reconfigurable organisms // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2020. Vol. 117. № 4. Pp. 1853-1859.

10. Macklin D.N., Ruggero N.A., Covert M.W. The future of whole-cell modeling // *Current opinion in biotechnology*. 2014. Vol. 28. Pp. 111-115.
11. Arshinov V.I. *Konvergentnyye tekhnologii v kontekste postneklassicheskoy paradigmy slozhnosti* [Convergent technologies in the context of the post-non-classical paradigm of complexity] // *Slozhnost'. Razum. Postneklassika*. [Complexity. Mind. Postnonclassics]. 2015. № 3. Pp. 42-54. DOI: 10.12737/13564
12. Arshinov V.I., Budanov V.G. *Kvantovo-slozhnostnaya paradigma. Mezhdistsiplinarnyy kontekst* [Quantum complexity paradigm. Interdisciplinary context]. Kursk: University book. 2015. 121 p.
13. Knyazeva E.N. *Transdistsiplinarnye strategii issledovaniy* [Transdisciplinary research strategies] // *Bulletin of TPGU*. 2011. № 10(112). Pp. 193-201.
14. Prigozhine I., Stengers I. *Poryadok iz khaosa: novyy dialog cheloveka s prirodoy* [Order from chaos: a new dialogue between man and nature]. Per. from English M.: Progress. 1986. 432 p.
15. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. *Aktual'nye metodologicheskie problemy mezhdistsiplinarnykh issledovaniy v oblasti bionanorobototekhniki* [Actual methodological problems of interdisciplinary research in the field of bionanorobotics] // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. № 6(92). Pp. 10-20.
16. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Nagoev Z.V. *Bionanorobototekhnika: kontseptualizatsiya, problematika i zadachi issledovaniy* [Bionanorobotics: conceptualization, problems and research objectives] // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. № 6. Pp. 11-17.
17. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. *Aspekty problemy regional'nogo upravleniya i koordinatsii vysokotekhnologichnykh projektov* [Aspects of the problem of regional management and coordination of high-tech projects] // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2019. № 6. Pp. 60-66.
18. Cvetkovic C. et al. Three-dimensionally printed biological machines powered by skeletal muscle // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. T. 111. № 28. Pp. 10125-10130.
19. Matas J., James S., Davison A.J. Sim-to-real reinforcement learning for deformable object manipulation. [Electronic resource]. URL: arXiv preprint arXiv:1806.07851. 2018.
20. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Denisenko V.A. *Vybor biologicheskogo nanosrukturnogo obyekt dlya issledovaniya yego svoystv s tochki zreniya paradigmy mekhatroniki* [The choice of a biological nanostructured object for studying its properties from the point of view of the mechatronics] // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. № 6(74). Pp. 30-37.
21. Abutalipov R.N., Zammoev A.U., Anchekov M.Yu. *Perspektivy primeneniya mikro- i nanosistemnoy tekhniki v biologii i meditsinskoj diagnostike. Problemy i zadachi LOC (laboratoriy na chipe)* [Perspectives of application of micro- and nanosystem equipment in biology and medical diagnostics. Problems and tasks of LoC (laboratories on the chip)] // *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016. № 6 (74). Pp. 5-10.
22. Abutalipov R.N., Zammoev A.U. *Perspektivy primeneniya magnitosom na nizhnem urovne fizicheskogo domena kognitivnoy infokommunikatsionnoy sistemy meditsinskogo onlayn-servisa na baze bionanoservisnykh ustroystv* [Prospects of the application of the magnetosome at the low level of the physical-domain of cognitive infocommunications system of medical online service on the basis of biosensor devices] // *Materialy vtoroy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Modeli myshleniya i integratsiya informatsionno-upravlyayushchikh sistem»* [Materials of the second International scientific conference "Thinking models and the integration of information and control systems"]. 2018. Pp. 201-205.
23. Zammoev A.U., Abutalipov R.N. *Kataliticheskiye samokhodnyye nanodvizhiteli – osnova elementnoy bazy dlya proyektirovaniya nanomekhatronnykh ustroystv i sistem dlya bionano-*

mashin v bionanorobototekhnike [Catalytic self-propelled nanomovers - the basis of the element base for the design of nanomechatronic devices and systems for bionanomachines in bionanorobototechnics] // News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2018. № 6-2(86). Pp. 149-156.

PROGRESS AND PROSPECTS OF BIONANOROBOTICS AT PRESENT STAGE OF DEVELOPMENT OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. NECESSITY AND OPPORTUNITY OF MODERNIZATION OF BIONANOROBOTICS FOR MOLECULAR BIOMANUFACTURING

R.N. ABUTALIPOV, A.U. ZAMMOEV

Institute of Computer Science and Problems of Regional Management –
Branch of Federal public budgetary scientific establishment «Federal scientific center
«Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»
360000, KBR, Nalchik, 37-a, I. Armand St.
E-mail: iipru@rambler.ru

After overcoming the cellular barrier and the emergence of “tissue chips” and multicellular engineering living systems, the goals and objectives of molecular production changed and these changes required changes for bionanorobotics, because bionanorobotics is focused on automated molecular production.

Keywords: mass molecular production, biointegration, “tissue chips”, organs-on-a-chip, M-CELS, convergence, divergence, biofabrication, biomanufacturing, living system, life form, molecular biomachines, biointegrated technologies, soft robotics.

Работа поступила 03.12.2020 г.

Сведения об авторах:

Абуталипов Ренат Надельшаевич, к.т.н., с.н.с. совместной лаборатории ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН.

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а.

E-mail: bnt_nat_2016@mail.ru

Заммоев Аслан Узейрович, к.т.н., зав. совместной лабораторией ИИПРУ КБНЦ РАН и НПО «Андроидная техника» «Бионаноробототехника», Институт информатики и проблем регионального управления Кабардино-Балкарского научного центра РАН.

360000, КБР, г. Нальчик, ул. И. Арманд, 37-а.

E-mail: zammoev@mail.ru

Information about the authors:

Abutalipov Renat Nadelshaevich, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher of “Bionanorobotics” joint laboratory of the Institute of Computer Sciences and Problems of Regional Management of KBSC of RAS and Scientific-Production Association “Android Technics”.

360000, KBR, Nalchik, I. Armand street, 37-a.

Zammoev Aslan Uzeyrovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the “Bionanorobotics” joint laboratory of the Institute of Computer Sciences and Problems of Regional Management of KBSC of RAS and Scientific-Production Association “Android Technics”.

360000, KBR, Nalchik, I. Armand street, 37-a.

E-mail: zammoev@mail.ru