

УДК 004.422.8:53.043

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-7-24>

EDN WLFJJ



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Комплекс программно-вычислительных средств моделирования терапевтических величин поглощенных доз в задачах лучевой терапии

А.Н. Соловьев^{1, 2, @},
Я.В. Кизилова¹,
Е.И. Казаков¹,
С.Н. Корякин^{1, 2}

¹ Медицинский радиологический научный центр имени А. Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Обнинск, Калужская область, 249031 Россия

² Обнинский институт атомной энергетики – филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск, Калужская область, 249039 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru

• Поступила: 27.09.2024 • Доработана: 06.02.2025 • Принята к опубликованию: 20.05.2025

Резюме

Цели. Моделирование поглощенных доз в радиотерапии является ключевым процессом в ходе лечения пациентов, а также выполняется с целью обеспечения гарантий качества терапии и ретроспективных оценок успешности проведенного лечения. С технической точки зрения предъявляемые требования к программному и аппаратному обеспечению весьма строгие для того, чтобы обеспечить успешный процесс принятия решения до, во время или после проведения терапии. Цель статьи – разработка и апробация технологического процесса обеспечения систем планирования лучевой терапии, а также создание расчетных модулей оценок поглощенных доз радиобиологического и терапевтического назначения.

Методы. Специализированное автоматизированное программное обеспечение, разработанное и поддерживаемое для обеспечения многоцелевых расчетов методом Монте-Карло, построено на основе технологий виртуализации для структурированного доступа к оборудованию, технологий передачи данных по разнородным каналам связи, различных физических моделей расчета взаимодействий излучения, которые совмещены в продукты для конечного пользователя.

Результаты. Комплекс позволяет решать широкий круг задач в интересах радиобиологических исследований, проводимых на пучках излучений разного качества, а также служить основой как для построения систем планирования лучевой терапии для действующих и вновь создаваемых установок, так и в интересах оценки отдаленных последствий действия терапевтического излучения.

Выводы. Разработанный комплекс программно-вычислительных средств является мощным инструментом, служащим для дальнейшего создания специализированных многоцелевых сред оценок поглощенных доз,

необходимых для терапевтического применения широкого круга радиационных технологий. Комплекс может быть модернизирован под потребности пользователей, а также дорабатываться разработчиками программного обеспечения под собственные нужды.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, моделирование физических величин, поглощенная доза, лучевая терапия, протонная терапия, нейтронная терапия, метод Монте-Карло

Для цитирования: Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Казаков Е.И., Корякин С.Н. Комплекс программно-вычислительных средств моделирования терапевтических величин поглощенных доз в задачах лучевой терапии. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):7–24. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-7-24>, <https://www.elibrary.ru/WLFGJJ>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Programming and computing suite for simulating the therapeutic absorbed dose in radiotherapy

Aleksei N. Solovev ^{1, 2, @},
Yana V. Kizilova ¹,
Evgeniy I. Kazakov ¹,
Sergey N. Koryakin ^{1, 2}

¹ A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Kaluga oblast, Obninsk, 249031 Russia

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Kaluga oblast, Obninsk, 249039 Russia

@ Corresponding author, e-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru

• Submitted: 27.09.2024 • Revised: 06.02.2025 • Accepted: 20.05.2025

Abstract

Objectives. Simulation of the absorbed dose is an essential part of radiation therapeutic treatment, performed not only for its correct evaluation, but also for assuring quality control and retrospective evaluation of the provided cure. From the technological point of view, strict requirements are imposed on the software applications and hardware units that support a successful decision-making process before, during, or after the provided therapy. This paper reports an R&D project aimed at technological support of radiation treatment planning systems coupled with the creation of a mathematical framework for estimating the absorbed dose for radiobiological and medical therapeutic purposes.

Methods. A dedicated automated software suite for executing multipurpose Monte Carlo simulations was developed. The suite is backed up with virtualization techniques for structured hardware access, data intercommunication using diverse connection channels, various physical interaction engines, and coupled end-user software.

Results. The developed suite facilitates a wide array of tasks in the realm of radiobiological research conducted using radiation beams of different qualities. Additionally, it serves as a foundation toolkit for developing radiotherapy planning systems for both existing and new therapeutic facilities, as well as software packages for estimation of the long-term effects of the conducted radiotherapy.

Conclusions. The developed programming and computing suite is an effective tool for organizing a specialized environment for multipurpose estimation of the absorbed dose of radiation for therapeutic applications of radiation beams of different qualities. The suite can be updated and extended upon end-user needs and modified by skilled software developers for specific purposes.

Keywords: programming and computing suite, physics-based simulation, absorbed dose, radiotherapy, proton therapy, neutron therapy, Monte Carlo method

For citation: Solovov A.N., Kizilova Ya.V., Kazakov E.I., Koryakin S.N. Programming and computing suite for simulating the therapeutic absorbed dose in radiotherapy. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):7–24. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-7-24>, <https://www.elibrary.ru/WLFGJJ>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Расчетно-математические задачи, которые необходимо решать в рамках процедуры лучевой терапии, можно условно разделить на 2 основных класса. К задачам 1-го класса относят задачи предлучевой подготовки пациента, когда необходимо в предельно короткое допустимое для принятия врачебного решения время обеспечить с необходимой точностью выполнение модельных терапевтических критериев эффективности и безопасности лечения пациента. Итогом решения задач 1-го класса является формирование ответа в терминах системы поддержки принятия врачебных решений о допустимости проведения курса терапии.

Задачи 2-го класса, напротив, не привязаны непосредственно напрямую к принятию решения о назначении терапии конкретному лицу, а направлены на верификацию и подтверждение характеристик ранее назначенного лечения, в т.ч. по критериям формирования ранних и поздних лучевых осложнений, ретроспективный анализ групп пролеченных пациентов с целью формирования прогноза выживаемости и качества выполненного ранее планирования либо с целью формирования альтернативных сценариев оценок успешности терапии.

Системы, решающие задачи 1-го класса, традиционно называют системами планирования лучевой терапии (англ., Treatment Planning System, TPS). К коммерчески доступным на рынке системам относятся *Raystation*¹ от RaysearchLabs, *Eclipse*² от Varian (Германия), *Pinnacle*³ от Philips (Нидерланды), *One*⁴ в вариантах *XiO*

и *Monaco* от Elekta (Швеция); на российском рынке также представлены комплекс *PLANB*⁵ от RT-7, *Амфора*⁶ от ООО «Медико-физический центр». Зачастую система планирования не является единым универсальным продуктом, а входит как элемент конечной физической установки, как, например, система планирования для комплекса нейтронной терапии на базе генератора НГ-24МТ (генератор нейтронов на основе реакции D(T, ⁴He)n, энергия нейтронов 14 МэВ) [1] и для отечественного ускорителя 6 МэВ (ускоритель электронов до энергии 6 МэВ медицинского назначения с тормозной вольфрамовой мишенью) [2], *XiDose* для центров углеродной терапии в Японии [3], *TRiP98* для центров углеродной терапии в Дармштадте и Гейдельберге, Германия [4], проекты использования *NCTPlan* Массачусетского института для нейтронозахватной терапии на реакторах Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» [5]. К специализированным средствам относят также системы *NeuCure* [6] и *NeuMANTA* [7], используемые в задачах нейтронозахватной терапии.

Особенностью систем планирования в классической схеме лучевой терапии является именно характеристика времени получения решения задачи дозиметрического планирования. Задачи же, связанные с оценкой долговременных (относительно курса терапии) последствий лечения, и дозиметрические особенности формирования дозы обычно моделируют с использованием более традиционных средств и методов Монте-Карло моделирования взаимодействий излучения с веществом, куда относят, например, *Geant4* [8], *FLUKA* [9], *MCNP* [10], *PHITS* [11], *SHIELD-HIT* [12]. Все эти средства моделирования валидируются мировым сообществом и предназначены для достоверно точного предсказания, в частности, величин поглощенных доз в целевых средах.

¹ <https://www.raysearchlabs.com/raystation/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

² <https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-planning/eclipse>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

³ <https://www.usa.philips.com/healthcare/solutions/radiation-oncology/radiation-treatment-planning>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

⁴ <https://www.elekta.com/products/oncology-informatics/elekta-one/treatment-applications/planning/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

⁵ <https://rt-7.ru/planb>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

⁶ <http://mphc.ru/catalog/amphora/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

Результаты подобных моделей используются далее в клинической и исследовательской практике, где до сих пор остаются нерешенные вопросы [13], связанные, в первую очередь, с пониманием отклика биологических систем разноуровневой организации, начиная от сложных механизмов действия радиации на клеточные культуры [14–17]. Также их применяют в *in vivo* исследованиях [18, 19], оценках безопасности полигонов радиоактивных отходов [20] и космических перелетах [21, 22], для верификации нагрузок на персонал комплексов лучевой терапии [23].

В настоящей статье приведены характеристики и особенности программно-технологической реализации универсального комплекса вычислительных средств, способного решать задачи обоих выше-описанных классов, а также обладающего широкими возможностями по взаимозаменяемости компонент и их модернизации. С использованием компонент комплекса возможно решать задачи предлучевой подготовки радиобиологических исследований, выполнять процедуры дозиметрического планирования лучевой терапии, ретроспективно проводить оценки биологического действия на основе эквивалентного прецизионного расчета поглощенных доз, а также строить прогностические модели описания повреждающего действия излучения и представлять полученные результаты в соответствии с международными формализмами МАГАТЭ⁷ и МКРЕ⁸ для конкретных видов излучений (ионное излучение ICRU 93⁹, нейтронозахватная терапия CRCP/BOR/002¹⁰).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При работе программно-аппаратного комплекса, допускающего функционирование в автоматизированном режиме, необходимо обеспечить интегративную связность отдельных компонент, а также возможность их управляемого запуска в своей очередности в зависимости от наличия соответствующих входных данных. На рис. 1 показана общая архитектура комплекса и отображены связи между компонентами, а также роли и места отдельных

пользователей. Сплошными линиями показаны принадлежности модулей, пунктирными линиями показаны информационные связи.

Основным требованием при разработке комплекса была возможность быстрой развертки его компонент на новой аппаратной платформе, территориально обособленной от иных компонент комплекса. При этом первоначальное построение программных средств, входящих в комплекс, и его внедрение были проведены на единой аппаратной базе, представленной одиночным средством высокопроизводительных вычислений, включающем двухпроцессорную систему на базе Intel Xeon Gold E5506 (Intel, США) с объемом подключенной оперативной памяти 380 ГБ, графический процессор NVIDIA Tesla V100 (NVIDIA, США), и систему хранения данных на базе серверных накопителей на жестких магнитных дисках производства Toshiba (Япония). Платформа подключена к локальной вычислительной сети экспериментального сектора МРНЦ им. А.Ф. Цыба¹¹, построенной на базе коммутаторов MikroTik (Латвия), обеспечивающих пропускную способность на уровне 1 Гбит/с. Внешний канал связи, используемый при апробации программных средств в качестве территориально-разъединенного комплекса, обеспечивал скорость передачи данных на уровне до 70 Мбит/с. Подключение оконечных рабочих мест операторов комплекса осуществлялось как в режиме внутренней сети с полной нагрузкой (1 Гбит/с), так и в режимах искусственно ограниченной типичной сети (100 Мбит/с) и удаленной сети (интернет-канал связи).

АРХИТЕКТУРА УПРАВЛЕНИЯ

Ввиду того, что основным требованием к архитектуре является организация разделяемой работы компонент, а физическое средство для организации серверного взаимодействия было представлено в единственном экземпляре, основным примененным технологическим приемом стала организация виртуализации. Для этого в качестве базовой операционной системы сервера использована Proxmox¹². Этот дистрибутив основан на Debian GNU/Linux, разрабатывается и поддерживается Австрийским интернет-сообществом (Internet Foundation Austria). В начале разработки системы использовалась версия Proxmox VE 6, позднее была успешно проведена миграция на Proxmox VE 7.1-11, в настоящее время доступна стабильная версия Proxmox VE 8.2.

¹¹ Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба. <https://new.nmicr.ru/about/>. Дата обращения 19.05.2025. [A. Tsyb Medical Radiological Research Center. <https://new.nmicr.ru/en/mrrc/>. Accessed May 19, 2025.].

¹² <https://www.proxmox.com/en/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

⁷ Международное агентство по атомной энергии. <https://www.iaea.org/ru>. Дата обращения 19.05.2025. [International Atomic Energy Agency. <https://www.iaea.org>. Accessed May 19, 2025.].

⁸ Международная комиссия по радиационным единицам и измерениям. <https://www.icru.org/>. Дата обращения 19.05.2025. [International Commission on Radiation Protection. <https://icrp.org/>. Accessed May 19, 2025.].

⁹ ICRU Report 93: Prescribing, Recording, and Reporting Light Ion Beam Therapy. <https://www.icru.org/report/icru-report-93-prescribing-recording-and-reporting-light-ion-beam-therapy/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

¹⁰ IAEA. Advanced in Boron Neutron Capture Therapy. Non-serial Publication. <https://www.iaea.org/publications/15339/advances-in-boron-neutron-capture-therapy>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

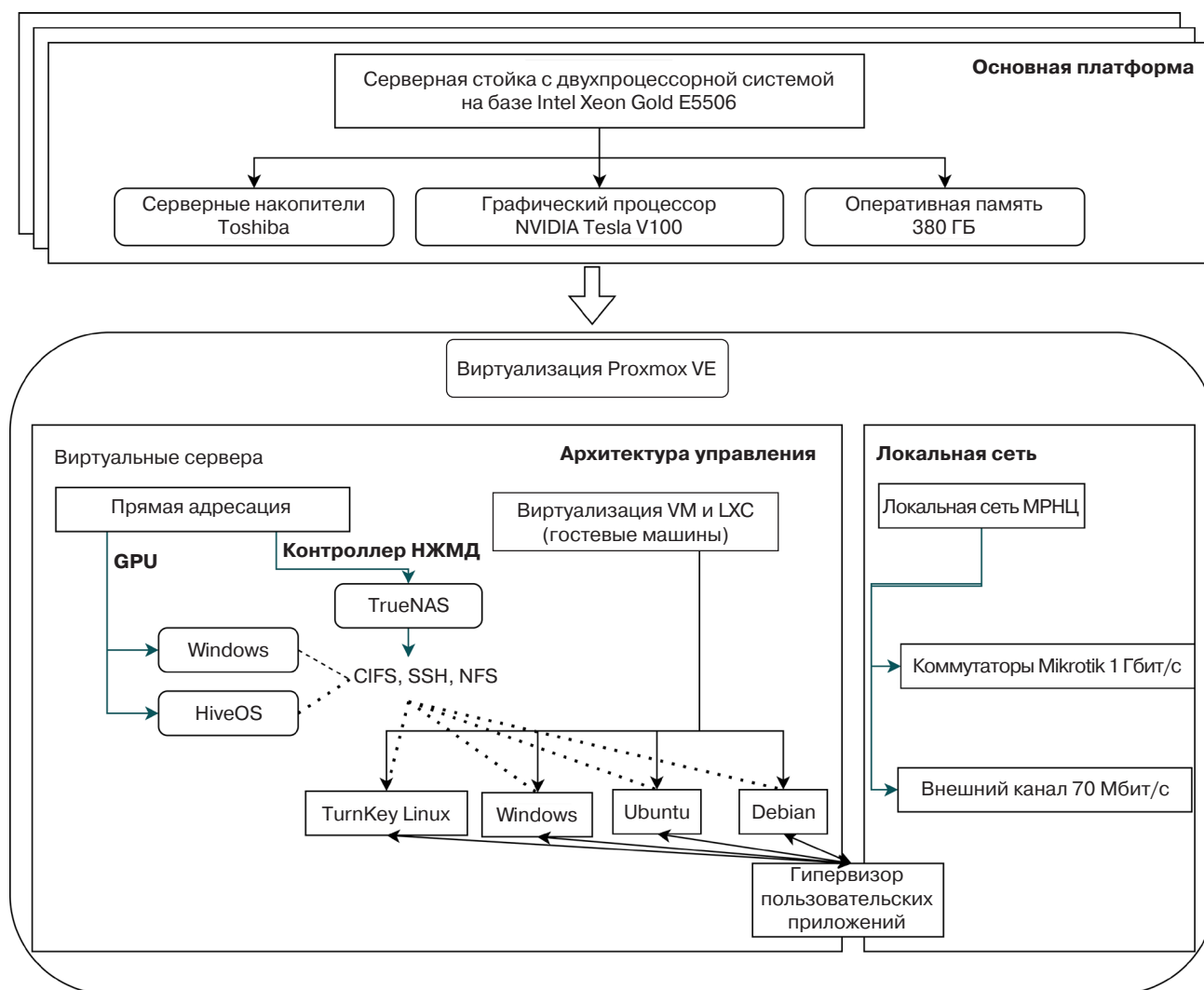


Рис. 1. Структурная схема программно-вычислительного комплекса:

GPU (graphics processing unit) – графический процессор, НЖМД – накопители на жестких магнитных дисках.
VM – виртуальная машина, LXC – упрощенная схема контейнеризации Linux

Быстрое хранилище данных системы (SSD-диск) разбито на основной сектор (для установки базовой среды Proxmox) и сектора управляемых серверов приложений. Каждое хранилище в данном случае представляет собой отдельное место на диске с возможностью расширения адресного пространства, в т.ч. при физической миграции носителя данных. Все долговременное хранилище организовано путем адресации полного пула дискового пространства физических устройств системы в созданный контейнер Proxmox, управляемый операционной системой TrueNAS¹³. На базе TrueNAS организован программный RAID-массив уровня 5 с доступом по протоколам CIFS¹⁴,

SSH¹⁵ и NFS¹⁶. Поддержка iSCSI¹⁷ при реализации [1] используется только в составе оконечного оборудования автоматизированных рабочих мест. Таким образом, предполагается, что все далее создаваемые компоненты серверной архитектуры используют в меньшей мере свое адресное пространство быстрого хранилища и обладают общим конфигурируемым доступом к общему файловому пространству долговременного хранилища.

Выделение оперативной памяти для каждого из последующих управляемых серверов при виртуализации Proxmox осуществляется на этапе создания сервера виртуализации, и, в зависимости

¹³ <http://www.truenas.com/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

¹⁴ <https://learn.microsoft.com/ru-ru/windows/win32/fileio/microsoft-smb-protocol-and-cifs-protocol-overview> (in Russ.). Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

¹⁵ <https://www.rfc-editor.org/info/rfc4251>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

¹⁶ <https://www.rfc-editor.org/info/rfc3010>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

¹⁷ <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7143>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

от конкретных параметров сервера, не всегда может быть динамически расширено без пересоздания сервера. В этой связи для каждой из задач, решаемых серверными вычислителями, необходимо понимание реального потребляемого ресурса архитектором системы и системным программистом. Нельзя при этом не отметить, что задача моделирования непосредственного радиационного ответа (например, опухоли), как и моделирование всего курса терапии с последующими вариантами развития событий ответа на лечение, несомненно являются задачами масштабных вычислений. Таким образом, задачей, решаемой человеком при организации уровня управления архитектурой управления, является, в т.ч. и выбор оптимальных параметров использования физических вычислительных средств.

Наконец, в рамках решения задачи управляемого конфигурируемого запуска уже оконечных приложений на отдельных серверах системы было разработано отдельное технологическое решение. Оно представляет собой собственный гипервизор, запускаемый по команде оконечного пользовательского средства, и обеспечивает дальнейший автоматический запуск, управление, контроль, получение и передачу результатов выполнения вычислительных средств на одном целевом сервере. В качестве целевого сервера может выступать любой сервер под управлением операционных систем семейства *nix, подключение и взаимодействие осуществляется по защищенному протоколу SSH, а конфигурация управляемых приложений задается текстовым файлом синтаксиса JSON¹⁸.

АРХИТЕКТУРА СЕРВЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

В разработанном комплексе все серверные вычислительные средства разделены на 2 класса. К 1-му классу относятся системы, развертываемые только в рамках виртуальной среды Proxmox и не требующие физической адресации серверных устройств. В целом, сюда просто относятся отдельные вычислительные узлы для задач, требующих только центральный процессор. Ко 2-му классу относятся системы, которые требуют от администратора сервера виртуализации настраивать физическую адресацию, что, в первую очередь, относится к графическому сопроцессору. Особенностью реализации таких средств является то, что в отдельный момент времени доступ такой системы к адресованной физической сущности является эксклюзивным. Таким

образом, например, все расчетные модели и средства, использующие видеокарту, должны либо подключаться к текущему активному серверу, использующему графический процессор, либо ожидать своей очереди на эксклюзивный доступ своего сервера к физическому ресурсу на хост-машине. При реализации компонент системы вне среды виртуализации, например, при наличии отдельных физических машин-вычислителей и машин с графическими картами, подобная задача может быть исключена из рассмотрения.

Этапы развертывания серверных вычислителей построены по классической схеме. В первую очередь, после установки и сборки операционной системы на выделенном узле и установки соответствующих обновлений осуществляется сборка целевого программного обеспечения узла. Для вычислительных узлов, задействованных в описанном комплексе по моделированию воздействий ионизирующих излучений, основным пакетом расчетных программ был *Geant4* [8] разработки ЦЕРН¹⁹ (Швейцария), при этом за время целевого использования комплекса в работе использовались версии, начиная с 4-9.5.0 (2016 г.) по 4-11.2.2 (2024 г.). Одной из особенностей пакета является выделение компонент библиотек сечений в отдельные загружаемые файлы с возможностью, в т.ч. автоматической загрузки на этапе сборки программы. Система сборки *Geant4* полностью построена на базе CMake²⁰, а версии, начиная с 4-10.0, могут собираться на любой целевой платформе компиляторами gcc, clang и msvc в зависимости от предпочтений разработчика. При этом, в отличие от подавляющего большинства аналогичных Монте-Карло средств, *Geant4* представляет собой не конечный исполняемый файл, а набор библиотек динамической или статической линковки для дальнейшего создания программистом собственного приложения. Впрочем, нельзя не отметить, что существуют именно готовые исполняемые файлы на базе *Geant4*, которыми пользователь уже управляет только путем подачи входных данных, как и в других аналогичных средах. К таким решениям относят *TOPAS*²¹, *GATE*²², *GAMOS*²³. В таблице представлены характерные времена установки различных

¹⁹ Европейский центр ядерных исследований (от фр. Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN). [Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN.]

²⁰ <https://cmake.org/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²¹ <https://www.topasmc.org/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²² <http://www.opengatecollaboration.org/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²³ <https://fismed.ciemat.es/GAMOS/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

¹⁸ JavaScript Object Notation – текстовый формат обмена данными. <https://dx.doi.org/10.17487/RFC4627>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

Таблица. Оценка производительности сборки различных версий *Geant4*

Версия <i>Geant4</i> (год выпуска <i>Geant4</i>)	Распаковка архива, мс	CMake конфигурация, мс	Make		
			1 поток, мс	16 потоков, мс	32 потока, мс
9.6.4 (2016)	1392	6275	1321462	116047	85899
10.0.0 (2016)	1504	7737	1721182	106263	82304
10.3.0 (2016)	1760	5497	3124605	164876	127049
10.4.0 (2017)	1636	2911	3538766	179560	138334
10.5.0 (2018)	1764	1761	2814052	216675	163520
10.7.0 (2020)	1787	6147	3715283	239053	185224
10.7.4 (2022)	1708	3612	3057118	256715	201234
11.0.0 (2021)	1599	9720	6450537	277412	211570
11.1.0 (2022)	1745	6532	4831937	299245	238212
11.2.0 (2023)	1662	4732	5031802	306279	238548
11.2.2 (2024)	1688	8582	3813355	306803	246890

версий *Geant4* на одном из выделенных серверов, функционирующих в настоящее время. Все замеры выполнены в автоматическом режиме посредством интерпретатора *bash* и системной **nix* утилиты *time*. Данные представлены в виде одиночного замера календарного (*wall time*) времени выполнения процедуры сборки.

При реализации расчетных программ для моделирования в рамках комплекса в зависимости от поставленной задачи использовалась та или иная версия программного обеспечения. Так, для решения задачи дозиметрического планирования в составе комплекса нейтронной терапии [1] использовалась стабильная версия 10.6.2, которая далее не обновлялась. Для ряда иных задач, в частности, описанных в [24], использовалась актуальная на тот момент версия 10.3.1. Все рутинное моделирование задач, возникающих в ходе деятельности отдела радиационной биофизики МРНЦ им. А.Ф. Цыба, всегда выполняется на последней стабильной на момент постановки задачи версии. Нельзя не отметить, что обратная совместимость пользовательского кода далеко не всегда гарантируется разработчиками среды *Geant4*, и, в первую очередь, не гарантируется совместимость с новыми версиями компиляторов. Особенно это актуально в случае явно стоящих требований по кроссплатформенности конечных приложений.

При этом стоит отметить, что использование конкретного средства математического моделирования действия излучения не является ограничивающим фактором. Ранее [25] было показано, что разнородные средства моделирования могут быть использованы как в решении задачи планирования лучевой терапии, так и интегрироваться под общую

архитектуру управляющих команд. Так, в настоящей работе запуск функционала, выполняемого на видеокартах, может осуществляться как напрямую из приложения среды *Geant4*, так и отдельно на обособленной виртуальной машине с использованием вывода приложения *Geant4* в качестве собственных входных данных, передаваемых по ранее описанным каналам связи.

АРХИТЕКТУРА СТАНДАРТИЗОВАННОГО ФОРМАТА ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

В представленном комплексе основным форматом конфигурационных файлов является JSON. Этот удобный формат позволяет осуществлять кроссплатформенную передачу пар «ключ-значение», при этом в качестве значений могут выступать как отдельные типы данных, так и списки, и словари значений. Однако ввиду специфики пользовательских данных, которые традиционно в подобных системах представляются в отраслевом формате DICOM²⁴, внутренний формат обмена данных в приложениях должен эффективно поддерживать передачу бинарных данных. Таким образом, при реализации работ комплекса было принято решение о внедрении отдельного формата хранения пользовательских промежуточных данных. В качестве основного формата для подобных задач

²⁴ Digital Imaging and Communications in Medicine – медицинский отраслевой стандарт создания, хранения, передачи и визуализации цифровых медицинских изображений и документов обследованных пациентов. [Digital Imaging and Communications in Medicine is a medical industry standard for creating, storing, transmitting, and visualizing digital medical images and documents of examined patients.]

было решено использовать описание передачи сообщений *protobuf*²⁵ от компании Google²⁶. После чего были написаны универсальные средства преобразования томографических снимков и ассоциированных контуров [26], фазовых пространств для средств Монте-Карло моделирования общего назначения [27] и сопутствующие выходные форматы. Формат и сами сообщения полностью переносимы между любыми операционными системами, а средства записи и чтения сообщений реализованы для большого количества языков программирования. Единственным ограничением использованного решения является тот факт, что максимальный размер сообщения не может быть более 2.14 Гб в виду адресации бинарного файла в области 32-разрядной памяти. Подобные целевые файлы могут возникать, например, при работе с томографическими изображениями с количеством пикселей 1024×1024 и числом срезов больше 200 и одновременно с ассоциированным числом контуров более 32. Для решения этой задачи реализован резервный формат на основе библиотек сериализации в составе Boost²⁷, однако недостатком такого решения является тот факт, что конечные целевые файлы могут быть непереносимы между операционными системами Linux и Windows.

АРХИТЕКТУРА ОКОНЕЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ СРЕДСТВ

В отличие от серверных средств обеспечения расчетов, которые целесообразно разворачивать только на базе операционных систем семейства Linux или BSD, требования, формируемые к оконечным рабочим станциям и клиентским машинам, могут быть менее строгими. В целом, можно сказать, что должна обеспечиваться развертка на любой системе, включая операционные системы Windows, Linux и macOS. Также любая пользовательская среда оконечного оборудования должна быть легко модернизируема. Таким образом, для работ по созданию конечных пользовательских интерфейсов было принято решение использовать язык программирования Python²⁸, а конечные исполняемые файлы собирать для конкретной операционной системы целевого оконечного рабочего места с использованием общедоступных средств сборки исполняемых файлов (например, *pyinstaller*²⁹). При этом

отдельные модули конечного программного средства, который имеют свои обособленные входные и выходные данные, реализуются в виде готовых исполняемых файлов, а интегративный доступ обеспечивается средствами файловой системы конечной среды и сетевой файловой системы, связанной серверами по вышеописанной схеме. К отдельным примерам такого подхода можно отнести специфические модули для стадии предлучевой подготовки [28], внешнюю систему оптимизации полей в режиме трехмерной конформной лучевой терапии [29].

На рис. 2 приведена архитектура использования оконечных пользовательских средств в составе рассматриваемого комплекса при его реализации в рамках задач комплексов нейтронной терапии (вариант 1), перспективных задач планирования (вариант 2) и смежных задач интеграции (вариант 3). Клиентское приложение на языке C# может вызывать отдельные модули языка Python и исполняемые файлы дополнительных приложений (*NGPlan.Visual.Client* и *RORReview*), а также имеет интерфейсы обмена со сторонними сервисами и отслеживания хода выполнения серверных задач. В рамках обеспечения потоков данных на сервере реализованы 3 варианта выполнения Монте-Карло расчетов, основные технологические компоненты которых представлены в своей очередности вызова. На рис. 3 приведен ряд скриншотов, иллюстрирующих внешний вид программных продуктов.

АПРОБАЦИЯ КОМПЛЕКСА В НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Первичная апробация технологической связности компонент проведена в рамках смежных работ по оценке радиационной стойкости изделий к воздействию тяжелых ионов [30]. В процессе выполнения моделирования, служащего обоснованием для последующих оценок величин линейных потерь энергии различных ионов через рассеиватели и атмосферу низкой (10 тор) плотности, использовался расчетный сервер, развернутый согласно описанию, приведенному ранее, а также автоматизированный анализ результатов, получаемых в виде гистограмм в пакете *ROOT* [31] разработки ЦЕРН. При этом проверялись механизмы коммуникации между расчетным сервером с *Geant4* и типовыми клиентами в виде проводника файловой системы Windows и клиентского приложения *root*.

Одним из основных приложений программного обеспечения комплекса являются всесторонние оценки величин биологической эффективности излучения. Один из первых результатов, относящихся к медицинскому применению комплекса, описан в работе [32], где компоненты комплекса, включая графический сопроцессор, в автоматизированном

²⁵ <https://protobuf.dev/reference/protobuf/edition-2023-spec/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²⁶ <https://about.google/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²⁷ <https://www.boost.org/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²⁸ <https://python.org/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

²⁹ <https://pyinstaller.org/>. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

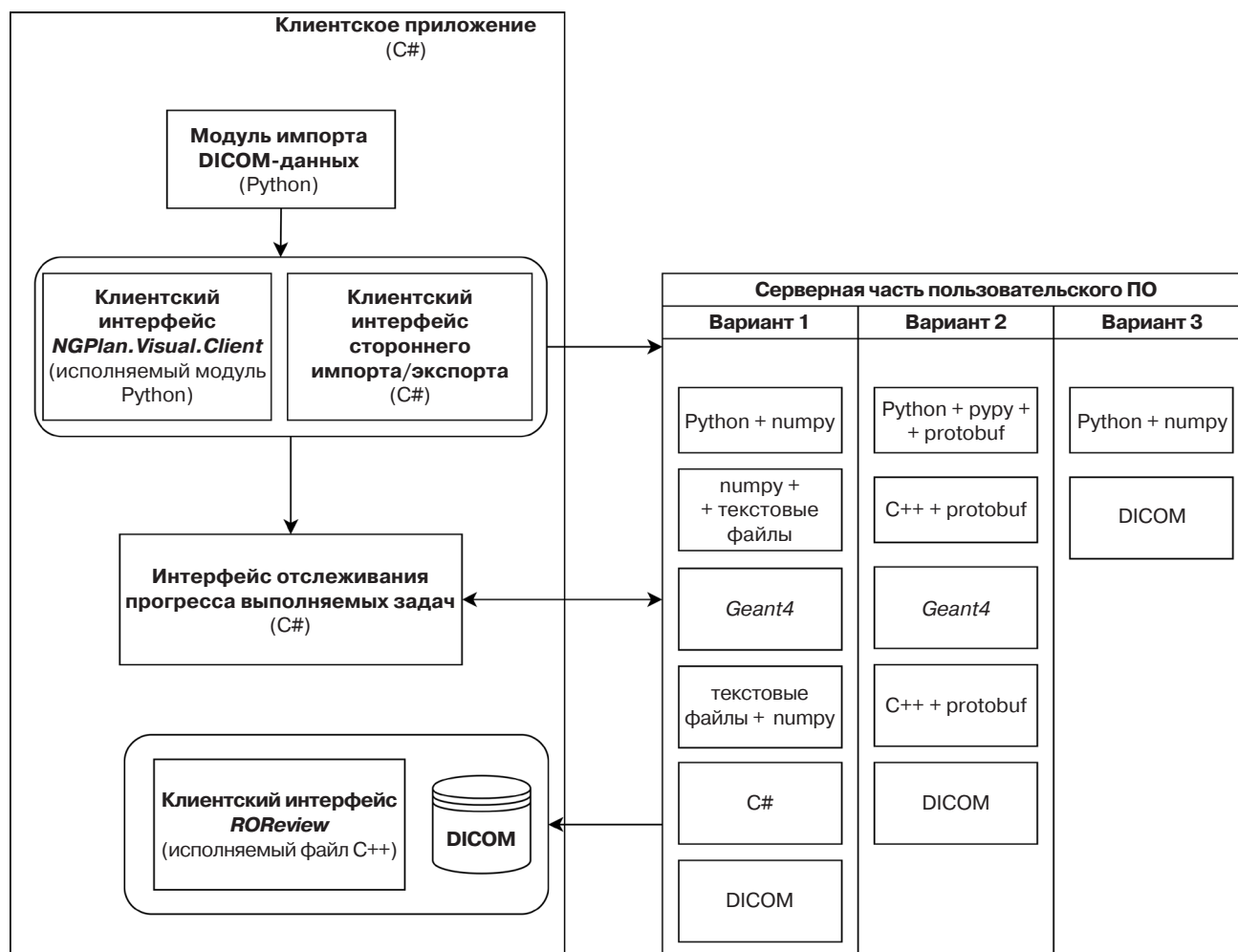


Рис. 2. Принципиальная схема организации конечных пользовательских приложений

режиме применялись для проведения ретроспективных оценок вклада в биологическую дозу протонной компоненты при облучении быстрыми нейтронами. Похожий пример³⁰ использования, но уже с целью оценки относительной биологической эффективности (ОБЭ) протонного излучения в сравнении с традиционным в клинической медицине значением ОБЭ 1.1, также был построен на базе представленного комплекса. При построении подобных моделей использовались преобразования чисел Хаунсфилда исходных томограмм на базе оптимизированной модели плотностей материалов [33], однако все операции в рамках представленного комплекса являются конфигурируемыми. Ведутся работы по созданию эргономичного пользовательского интерфейса для

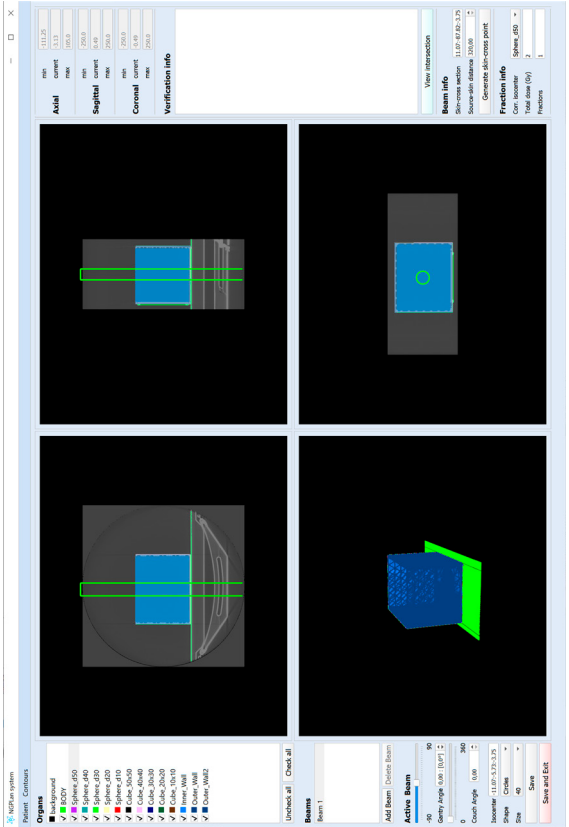
удобного ввода данных на стадии ввода в эксплуатацию систем планирования, реализованных или предназначенных к реализации в составе описанного комплекса.

Результаты натурной апробации математических моделей оптимизации выгрузки модифицированного пика Брэгга для протонов в форме файла-задания для ускорителя комплекса протонной терапии «Прометеус» (г. Обнинск, Россия) представлены в работе [34]. В рамках выполнения этого исследования на базе вышеописанных подходов к математическому моделированию действия протонного излучения осуществлялось формирование управляющих команд, которые затем передавались в управляющую систему ускорителя [35]. Аналогичная задача создания управляющих команд решалась в работе [36] по выявлению морфологических изменений в клетках опухоли после имплантации в животное-опухоленоситель. В целом подобный подход к автоматизации радиобиологических исследований показывает свою эффективность и позволяет существенно сократить время подготовки к эксперименту путем унификации типовых решений.

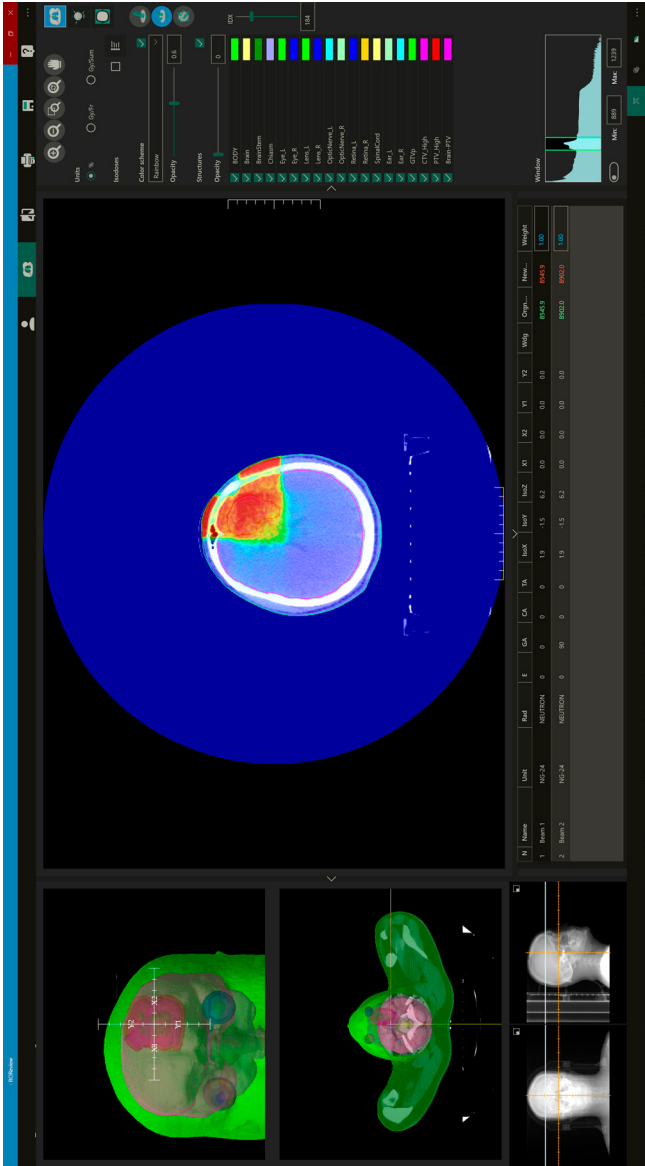
³⁰ Смык Д.И. Протонная терапия при повторном облучении рецидивных опухолей органов головы и шеи. Дис. ... канд. мед. наук. <https://new.nmicr.ru/wp-content/uploads/2024/05/dissertacija-smyk.pdf>. [Smyk D.I. Proton therapy in re-irradiation of recurrent tumors of head and neck organs. Thesis for a Candidate Degree in Medical Sciences. <https://new.nmicr.ru/wp-content/uploads/2024/05/dissertacija-smyk.pdf> (in Russ.).]



(б)



(а)



(в)

Рис. 3. Внешний вид отдельных программных средств комплекса:
(а) интерфейс *NGPlan*. *Visual Client* для работы с расположением облучателя на стадии предлучевой подготовки пациента,
(б) интерфейс утилиты стороннего импорта/экспорта, *ROReview* в режиме отображения дозного поля

Наконец, наиболее полно программно-вычислительный комплекс зарекомендовал себя в задачах экспериментальной деятельности на временном радиобиологическом стенде [37], а позднее – в рамках центра коллективного пользования ускорительного комплекса У-70 (ЦКП «РБС У-70»³¹). При работе над первичной оценкой биологической эффективности пучка ионов углерода [38] использовались данные о среднедозной величине линейной передачи энергии, рассчитанные в подробной модели облучаемого объекта для различных экспериментальных условий. Подходы по созданию средств пассивной модификации углеродного излучения, описанные ранее [39], реализованные позднее как программный пакет в составе описываемого комплекса и непосредственно изготовленные гребенчатые фильтры применялись другими авторами [40, 41]. Работы радиобиологического стенда комплекса У-70 в целом описаны, например, в [42], подходы к формированию каналов медико-терапевтического назначения – в [43].

ОБСУЖДЕНИЕ

К одному из важных аспектов использования систем планирования лучевой терапии в клинической практике относятся организация трансфера данных между различными системами и связность программных компонент внутри системы. Так, в [44] было показано, что даже в условиях передачи одного и того же набора DICOM-данных разные системы планирования (в рассматриваемой статье – *MRIdian TPS* и *Eclipse*) значимо (до 16%) отличаются в интерпретации объемов структур, а, как следствие, и в интерпретации дозо-объемных показателей. При этом с учетом обилия систем как представленных для широкого потребителя на рынке, так и собственных (англ., *in-house*) систем отдельных клиник [45–49], остро встает вопрос в обеспечении связности и эквивалентности докладываемых клинических результатов. Как показывает клиническая практика, даже в одной и той же клинике для одного и того же ускорителя или лечебной кабины могут применяться две [50] и более системы планирования, а решение о назначении терапии происходит после анализа лечащим врачом-радиотерапевтом или врачебным консилиумом всех альтернативных предлагаемых сценариев.

Основным направлением развития расчетных систем, обеспечивающих решение задач моделирования поглощенных доз в лучевой терапии, является многократное увеличение производительности

расчетов с сохранением при этом точности на уровне прецизионных Монте-Карло систем. Именно в связи с этим все большее развитие приобретают расчеты с использованием графических процессоров. В задачах моделирования радиобиологического отклика на уровне ДНК, клеточном и межклеточном уровнях организации материи, включая радиолиз воды, уже давно используют графические ускорители [51, 52]. В то же время моделирование в интересах лучевой терапии начало развиваться только в последние годы. Так, в [53] предлагают разработку *goСМС*, в т.ч. с поддержкой вычислительного модуля для терапии ионами углерода, которые позволяют получить время расчета одного плана в пределах 40 мин. При этом производители позволяют интегрировать свой подход в коммерческую систему планирования *Eclipse*. Похожая задача, но применительно к интраоперационной высокоомощностной терапии электронами, решается в [54], при этом скорость расчета на видеокarte составляет до 10 с. Более ранние решения, например, описанные для протонной терапии в [55], становятся основой экспериментальной валидации применяемых подходов, показывая не только времена на уровне от 3.5 до 11.5 с на пучок против 20 с для решения на базе центрального процессора, но и отличное соответствие измеренным значениям по критериям гамма-индекса (более 95% проходящих точек по критерию 3%/1 мм). Еще одним решением, предложенным для оперативного расчета сканирующих ионных пучков, является система *VQA Plan* [56] производства Hitachi, специально разработанная для ионного центра в г. Осака (Япония). При этом авторы заявляют, что именно расчет биологической составляющей дозы углеродных пучков является отличительной чертой представленной системы в отличие от упрощенных аналогов в *XiDose* и *RayStation*. Реализация быстрых вычислительных алгоритмов для подобных систем на базе графических процессоров представляется сложным вызовом, который необходимо планомерно решать с привлечением широкого круга специалистов [57, 58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные подходы к лучевой терапии требуют не только выполнения критериев качества медицинских услуг, но и обеспечения безопасности лечения. Организация эффективной программно-вычислительной среды широкого назначения поможет решить, в т.ч. проблемы интеграции разнородных медицинских специалистов, разработчиков программного обеспечения, радиационных технологий. В рамках перспективных направлений развития могут быть рассмотрены механизмы внедрения

³¹ <http://ihp.ru/pages/main/6580/8769/index.shtml> (in Russ.). Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

технологий квантовых вычислений и искусственного интеллекта. Ведутся работы по массовому внедрению разработанных технологий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Шершневу Р.В. и Степановой У.А. за вклад в развитие комплекса в период работы в лаборатории; исполняющему обязанности заведующего лабораторией разработки и эксплуатации облучающей техники Сабурову В.О. и системному администратору Печенину А.А. за помощь в организации технологического процесса; дирекции МРНЦ им. А.Ф. Цыба в лице директора Иванова С.А. за конструктивный подход к реализации медицинских задач; дирекции НМИЦ радиологии в лице заместителя директора по науке Шегая П.В. и генерального директора Каприна А.Д. за обширные дискуссии по тематике проблемы и за ее пределами.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank R.V. Shershnev and U.A. Stepanova for their contribution to the development of the suite during their work in the Laboratory; V.O. Saburov, Acting Head of the Laboratory of the Development and Operation of Irradiation equipment, and A.A. Pechenin, System Administrator, for their help in organizing the technological process; the Directorate of the A. Tsyb MRRC represented by Director S.A. Ivanov

for the constructive approach to the implementation of medical tasks; the Directorate of NMRC Radiology represented by Deputy Director for Science P.V. Shegay and General Director A.D. Kaprin for extensive discussions on the subject of the problem and beyond.

Вклад авторов

А.Н. Соловьев – написание черновика рукописи, разработка программного обеспечения, разработка концепции, административное руководство исследовательским проектом, разработка методологии, проведение исследования.

Я.В. Кизилова – визуализация, формальный анализ, курирование данных, разработка программного обеспечения, проведение исследования, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Е.И. Казаков – проведение исследования, предоставление ресурсов, валидация результатов, разработка методологии.

С.Н. Корякин – предоставление ресурсов, научное руководство, валидация результатов, получение финансирования, написание рукописи – рецензирование и редактирование.

Authors' contributions

A.N. Solovlev – writing the original draft, software, conceptualization, project administration, methodology, and investigation.

Ya.V. Kizilova – visualization, formal analysis, data curation, software, investigation, writing the review, and editing.

E.I. Kazakov – investigation, resources, validation, and methodology.

S.N. Koryakin – resources, supervision, validation, funding acquisition, writing the review, and editing.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мардынский Ю.С., Гулидов И.А., Гордон К.Б., Корякин С.Н., Соловьёв А.Н., Сабуров В.О., Иванов С.А., Каприн А.Д., Лобжанидзе Т.К., Марков Н.В., Железнов И.М., Юрков Д.И., Герасимчук О.А., Пресняков А.Ю., Зверев В.И., Смирнов В.П. Дистанционная нейтронная терапия: первый отечественный медицинский комплекс. *Вестник Российской Академии Наук*. 2024;94(1):80–86. <https://doi.org/10.31857/S0869587324010098>
2. Rod'ko I.I., Sarychev G.A., Balakirev P.V., et al. Development of a Radiotherapy System Based on 6 MeV Linac and Cone-Beam Computer Tomograph. *At. Energy*. 2019;125(5):333–337. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00490-9>
3. Inaniwa T., Kanematsu N., Noda K., Kamada T. Treatment planning of intensity modulated composite particle therapy with dose and linear energy transfer optimization. *Phys. Med. Biol.* 2017;62(12):5180–5197. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa68d7>
4. Krämer M. Swift ions in radiotherapy – Treatment planning with TRiP98. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2009;267(6):989–992. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.02.015>
5. Elyutina A.S., Kiger W.S., Portnov A.A. NCTPlan application for neutron capture therapy dosimetric planning at MEPhI nuclear research reactor. *Appl. Radiat. Isot.* 2011;69(12):1888–1891. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.04.018>
6. Takeuchi A., Hirose K., Kato R., Komori S., Sato M., Motoyanagi T., Yamazaki Y., Narita Y., Takai Y., Kato T. Evaluation of calculation accuracy and computation time in a commercial treatment planning system for accelerator-based boron neutron capture therapy. *Radiol. Phys. Technol.* 2024;17(4):907–917. <https://doi.org/10.1007/s12194-024-00833-7>
7. Tenk Y.C., Chen J., Zhong W.B., Lio Y.H. HU-based material conversion for BNCT accurate dose estimation. *Sci. Rep.* 2023;13:15701. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42508-0>
8. Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016;835:186–225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>

9. Ahdida C., Bozzato D., Calzolari D., et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Front. Phys.* 2022;9:788253. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.788253>
10. Rising M.E., Armstrong J.C., Bolding S.R., et al. MCNP® Code V.6.3.0 Release Notes. *Tech. Rep. LA-UR-22-33103, Rev. 1.* Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA. 2023. 55 p. URL: CoverSheet
11. Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S., et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33. *J. Nuclear Sci. Technol.* 2023;61(1):127–135. <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736>
12. Bassler N., Hansen D.C., Lühr A., Thomsen B., Petersen J.B., Sobolevsky N. SHIELD-HIT12A – a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014;489:012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/489/1/012004>
13. Muraro S., Battistoni G., Kraan A.C. Challenges in Monte Carlo Simulations as Clinical and Research Tool in Particle Therapy: A Review. *Front. Phys.* 2020;8:567800. <https://doi.org/10.3389/fphys.2020.567800>
14. Petringa G., Romano F., Manti L., et al. Radiobiological quantities in proton-therapy: Estimation and validation using Geant4-based Monte Carlo simulations. *Phys. Med.* 2019;58:72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.01.018>
15. Troshina M.V., Koryakina E.V., Potetnya V.I., Koryakin S.N., Pikalov V.A., Antipov Yu.M. Induction of chromosome aberrations in B14-150 cells following carbon ions irradiation at low doses. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1701:012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012029>
16. Kyriakou I., Sakata D., Tran H.N., et al. Review of the Geant4-DNA simulation toolkit for radiobiological applications at the cellular and DNA level. *Cancers.* 2022;14(1):35. <https://doi.org/10.3390/cancers14010035>
17. Chatzipapas K., Dordevic M., Zivkovic S., et al. Geant4-DNA simulation of human cancer cells irradiation with helium ion beams. *Phys. Med.* 2023;112:102613. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102613>
18. Pisciotto P., Cammarata F.P., Stefano A., et al. Monte Carlo GEANT4-based application for *in vivo* RBE study using small animals at LNS-INFN preclinical hadrontherapy facility. *Phys. Med.* 2018;54:173–178. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.07.003>
19. Taha E., Djouider F., Banoqitah E. Monte Carlo simulations for dose enhancement in cancer treatment using bismuth oxide nanoparticles implanted in brain soft tissue. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 2018;41:363–370. <https://doi.org/10.1007/s13246-018-0633-z>
20. Cadini F., De Sanctis J., Girotti T., Zio E., Luce A., Taglioni A. Monte Carlo-based assessment of the safety performance of a radioactive waste repository. *Reliability Engineering & System Safety (RESS).* 2010;95(8):859–865. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.002>
21. Geng C., Tang X., Gong C., Guan F., Johns J., Shu D., Chen D. A Monte Carlo-based radiation safety assessment for astronauts in an environment with confined magnetic field shielding. *J. Radiol. Prot.* 2015;35(4):777. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/777>
22. Archer J.W., Large M.J., Bolst D., et al. A multiscale nanodosimetric study of GCR protons and alpha particles in the organs of astronauts on the lunar surface. *Rad. Phys. Chem.* 2025;229:112448. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112448>
23. Чернуха А.Е., Сабуров В.О., Адарова А.И., Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Корякин С.Н. Трехмерные модели и дополнение геометрии для оценки доз в лучевой кабине нейтронной терапии на базе генератора НГ-24МТ. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2022;3:158–167. <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.14>
24. Koryakin S., Isaeva E., Beketov E., Solovov A., Ulyanenko L., Fedorov V., Lityaev V., Ulyanenko S. The photon capture therapy model for *in vivo* and *in vitro* studies using Au nanocomposites with the hyaluronic acid based compounds. *RAD Journal.* 2017;2(2):86–89. <http://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.019>
25. Solovyev A.N., Fedorov V.V., Kharlov V.I., Stepanova U.A. Comparative analysis of MCNPX and GEANT4 codes for fast-neutron radiation treatment planning. *Nuclear Energy Technol.* 2015;1(1):14–19. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2015.11.004>
26. Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Корякин С.Н. Программное средство преобразования медицинских изображений отраслевого стандарта DICOM в форматы оперативного доступа: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2023685423 РФ. Номер заявки 2023683925; заявл. 13.11.2023; опублик. 27.11.2023. Бюл. № 12. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=56012725>.
27. Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Чернуха А.Е., Мерзликин Г.В., Корякин С.Н. Программное средство универсального преобразования фазовых пространств в форматы оперативного доступа: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2024660249 РФ. Номер заявки 2024618897; заявл. 24.04.2024; опублик. 03.05.2024. Бюл. № 5. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=67263924>.
28. Соловьев А.Н., Кизилова Я.В., Зверев В.И., Пресняков А.Ю., Корякин С.Н. Вспомогательная утилита визуальной верификации пересечений среза коллиматора с телом пациента на стадии предлучевой подготовки: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2024665975 РФ. Номер заявки 2024665975; заявл. 28.06.2024; опублик. 09.07.2024. Бюл. № 7.
29. Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Корякин С.Н., Пресняков А.Ю., Зверев В.И. Автоматизированное средство оптимизации полей быстрой нейтронной терапии в режиме 3D-CRT по среднеквадратичному отклонению на основе алгоритма Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно в реализации pytorch: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2024666070 РФ. Номер заявки 2024664787; заявл. 28.06.2024; опублик. 09.07.2024. Бюл. № 7.
30. Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I., et al. Analysis of Metrological Provision Problems of a Test Stand for Testing Radio-Electronic Products for Resistance to Irradiation with High-Energy Heavy Ions. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2019;16:734–743. <https://doi.org/10.1134/S1547477119060098>

31. Brun R., Rademakers F. ROOT — An object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1997;389(1–2):81–86. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X)
32. Гордон К.Б., Сабуров В.О., Корякин С.Н., Гулидов И.А., Фатхудинов Т.Х., Арутюнян И.В., Каприн А.Д., Соловьев А.Н. Расчет биологической эффективности протонной компоненты при нейтронном облучении 14.8 МэВ методами вычислительной биологии с использованием видеокарт. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 2022;173(2):263–267. <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-173-2-263-267>
33. Schneider W., Bortfeld T., Schlegel W. Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions *Phys. Med. Biol.* 2000;45(2):459. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/2/314>
34. Kotb O.M., Solovet A.N., Saburov V.O., et al. Response of the FBX aqueous chemical dosimeter to high energy proton and electron beams used for radiotherapy research. *Radiat. Phys. Chem.* 2024;216:111451. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111451>
35. Balakin V.E., Bazhan A.I., Alexandrov V.A., et al. Updated Status of Protom Synchrotrons for Radiation Therapy. In: *27 Russian Particle Acc. Conf. (Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia). J. Accelerator Conferences Website (JACoW) Publishing*. 2021. P. 120–123. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB05>
36. Южаков В.В., Корчагина К.С., Фомина Н.К., Корякин С.М., Соловьев А.Н., Ингель И.Э., Корецкая А.Е., Севанькаева Л.Е., Яковлева Н.Д., Цыганова М.Г. Действие гамма-излучения и сканирующего пучка протонов на морфофункциональные характеристики саркомы М-1 крыс. *Радиация и риск*. 2020;29(2):101–114. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-2-101-114>
37. Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Потетня В.И. Программа поддержки принятия решений по радиобиологическим экспериментам на временном радиобиологическом стенде ускорительного комплекса У-70: программа для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства) 2020615172 РФ. Номер заявки 2020614229; заявл. 14.05.2020; опублик. 18.05.2020. Бюл. № 5. <https://elibrary.ru/item.asp?id=43880348>.
38. Beketov E., Isaeva E., Malakhov E., Nasedkina N., Koryakin S., Ulyanenko S., Solovet A., Lychagin A. The study of biological effectiveness of U-70 accelerator carbon ions using melanoma B-16 clonogenic assay. *RAD Journal*. 2017;2(2): 90–93. <https://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.020>
39. Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Трошина М.В., Лычагин А.А., Пикалов В.А., Харлов В.И., Ульяненко С.Е. Разработка средств пассивной модификации пучка ионов углерода ускорительного комплекса У-70 для радиобиологических исследований. *Медицинская физика*. 2016;4(72):47–54. <https://elibrary.ru/item.asp?id=27428891>
40. Заичкина С.И., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Дюкина А.Р., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С., Сорокина С.С., Пикалов В.А. Оценка биологической эффективности ускоренных ионов углерода с энергией 450 МэВ/нуклон в ускорительном комплексе У-70 по критерию выживаемости мышей. *Биофизика*. 2019;64(6):1208–1215. <http://doi.org/10.1134/S0006302919060206>
[Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Dyukina A.R., Belyakova T.A., Strelnikova N.S., Sorokina S.S., Pikalov V.A. Assessment of the Biological Efficiency of 450 MeV/Nucleon Accelerated Carbon Ions in the U-70 Accelerator According to the Criterion of Mouse Survival. *BIOPHYSICS*. 2019;64:991–998. <https://doi.org/10.1134/S000635091906023X>]
41. Kuznetsova E.A., Sirota N.P., Mitroshina I.Yu., Pikalov V.A., Smirnova E.N., Rozanova O.M., Glukhov S.I., Sirota T.V., Zaichkina S.I. DNA damage in blood leukocytes from mice irradiated with accelerated carbon ions with an energy of 450 MeV/nucleon. *Int. J. Radiat. Biol.* 2020;96(10):1245–1253. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1807640>
42. Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P. The Results Obtained on “Radiobiological Stand” Facility, Working with the Extracted Carbon Ion Beam of the U-70 Accelerator. In: *27 Russian Particle Acc. Conf. (Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia). J. Accelerator Conferences Website (JACoW) Publishing*. 2021. P. 124–126. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06>
43. Гаркуша В.И., Иванов С.В., Калинин В.А., Максимов А.В., Маркин А.М., Новоскольцев Ф.Н., Пикалов В.А., Солдатов А.П., Синюков Р.Ю. Создание каналов пучков ионов углерода для проведения радиобиологических и предклинических исследований на ускорительном комплексе У-70. *Приборы и техника эксперимента* 2024;8(S2):14.
44. Meffe G., Votta C., Turco G., Chillè E., et al. Impact of data transfer between treatment planning systems on dosimetric parameters. *Phys. Med.* 2024;121:103369. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103369>
45. Mosleh Shirazi M.A., Faghihi R., Siavashpour Z., Nedaie H.A., Mehdizadeg S., Sina S. Independent evaluation of an *in-house* brachytherapy treatment planning system using simulation, measurement and calculation methods. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 2012;13(2):103–112. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v13i2.3687>
46. Kumada H., Takada K., Aihara T., Matsumura A., Sakurai H., Sakae T. Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba. *Appl. Radiat. Isot.* 2021;166:109222. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109222>
47. Moyers M.F., Lin J., Li J., Chen H., Shen Z. Optimization of the planning process with an *in-house* treatment information, management, and planning system. *Radiat. Med. Protect.* 2022;3(3):102–107. <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2022.07.004>
48. Shao Y., Gui J., Wang J., et al. Novel *in-house* knowledge-based automated planning system for lung cancer treated with intensity-modulated radiotherapy. *Strahlenther. Onkol.* 2023;200(11):967–982. <https://doi.org/10.1007/s00066-023-02126-1>
49. Guo Y., Liu Z., Feng S., Cai H., Zhang Q. Clinical Viability of an Active Spot Scanning Beam Delivery System with a Newly Developed Carbon-Ion Treatment Planning System. *Adv. Radiat. Oncol.* 2024;9(7):101503. <https://doi.org/10.1016/j.adro.2024.101503>

50. Калыганова Н.В., Киселев В.А., Кашенцева Н.В., Удалов Ю.Д., Гриценко С.Е. Сравнение дозиметрических характеристик планов протонной и лучевой терапии с модуляцией интенсивности при глиобластоме головного мозга. В сб.: *Ильинские чтения 2022: Сборник материалов школы-конференции молодых ученых и специалистов*. М., 2022. С. 141–142. <https://elibrary.ru/item.asp?id=49488724>
51. Okada S., Murakami K., Amako K., et al. GPU Acceleration of Monte Carlo Simulation at the Cellular and DNA Levels. In: Chen Y.W., Torro C., Tanaka S., Howlett R. (Eds.). *Innovation in Medicine and Healthcare 2015. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Springer; 2016. V. 45. P. 323–332. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23024-5_29
52. Okada S., Murakami K., Incerti S., Amako K., Sasaki T. MPEXS-DNA, A new GPU-based Monte Carlo simulator for track structure and radiation chemistry at subcellular scale. *Med. Phys.* 2019;46(3):1483–1500. <https://doi.org/10.1002/mp.13370>
53. Qin N., Shen C., Tasi M.Y., et al. Full Monte Carlo–Based Biologic Treatment Plan Optimization System for Intensity Modulated Carbon Ion Therapy on Graphics Processing Unit. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2018;100(1):235–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2017.09.002>
54. Franciosini G., Carlotti D., Cattani F., et al. IOeRT conventional and FLASH treatment planning system implementation exploiting fast GPU Monte Carlo: The case of breast cancer. *Phys. Med.* 2024;121:103346. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103346>
55. Magro G., Mein S., Kopp B., et al. FRoG dose computation meets Monte Carlo accuracy for proton therapy dose calculation in lung. *Phys. Med.* 2021;88:66–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.05.021>
56. Yagi M., Tsubouchi T., Hamatani N., Takashina M., Maruo H., Fujitaka S., et al. Commissioning a newly developed treatment planning system, VQA Plan, for fast-raster scanning of carbon-ion beams. *PLoS ONE*. 2022;17(5):e0268087. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268087>
57. Lu Y., Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A., Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. *J. Ind. Inform. Integr.* 2023;35:100511. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511>
58. Giraud P., Bibault J.E. Artificial intelligence in radiotherapy: Current applications and future trends. *Diagn. Interv. Imaging.* 2024;105(12):475–480. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2024.06.001>

REFERENCES

1. Mardynsky Yu.S., Gulidov I.A., Gordon K.B., Koryakin S.N., Solovyov A.N., Saburov V.O., Ivanov S.A., Kaprin A.D., Lobzhanidze T.K., Markov N.V., Zheleznov I.M., Yurkov D.I., Gerasimchuk O.A., Presnyakov A.Yu., Zverev V.I., Smirnov V.P. External-Beam Neutron Therapy: The First Domestic Medical Unit. *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk (Herald of the Russian Academy of Sciences)*. 2024;94(1):80–86 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869587324010098>
2. Rod'ko I.I., Sarychev G.A., Balakirev P.V., et al. Development of a Radiotherapy System Based on 6 MeV Linac and Cone-Beam Computer Tomograph. *At. Energy*. 2019;125(5):333–337. <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00490-9>
3. Inaniwa T., Kanematsu N., Noda K., Kamada T. Treatment planning of intensity modulated composite particle therapy with dose and linear energy transfer optimization. *Phys. Med. Biol.* 2017;62(12):5180–5197. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa68d7>
4. Krämer M. Swift ions in radiotherapy – Treatment planning with TRiP98. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 2009;267(6):989–992. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2009.02.015>
5. Elyutina A.S., Kiger W.S., Portnov A.A. NCTPlan application for neutron capture therapy dosimetric planning at MEPhI nuclear research reactor. *Appl. Radiat. Isot.* 2011;69(12):1888–1891. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.04.018>
6. Takeuchi A., Hirose K., Kato R., Komori S., Sato M., Motoyanagi T., Yamazaki Y., Narita Y., Takai Y., Kato T. Evaluation of calculation accuracy and computation time in a commercial treatment planning system for accelerator-based boron neutron capture therapy. *Radiol. Phys. Technol.* 2024;17(4):907–917. <https://doi.org/10.1007/s12194-024-00833-7>
7. Tenk Y.C., Chen J., Zhong W.B., Lio Y.H. HU-based material conversion for BNCT accurate dose estimation. *Sci. Rep.* 2023;13:15701 <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42508-0>
8. Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2016;835:186–225. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
9. Ahdida C., Bozzato D., Calzolari D., et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Front. Phys.* 2022;9:788253. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.788253>
10. Rising M.E., Armstrong J.C., Bolding S.R., et al. MCNP® Code V.6.3.0 Release Notes. *Tech. Rep. LA-UR-22-33103, Rev. 1*. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA. 2023. 55 p. URL: CoverSheet
11. Sato T., Iwamoto Y., Hashimoto S., et al. Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33. *J. Nuclear Sci. Technol.* 2023;61(1):127–135. <https://doi.org/10.1080/00223131.2023.2275736>
12. Bassler N., Hansen D.C., Lühr A., Thomsen B., Petersen J.B., Sobolevsky N. SHIELD-HIT12A – a Monte Carlo particle transport program for ion therapy research. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014;489:012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/489/1/012004>
13. Muraro S., Battistoni G., Kraan A.C. Challenges in Monte Carlo Simulations as Clinical and Research Tool in Particle Therapy: A Review. *Front. Phys.* 2020;8:567800. <https://doi.org/10.3389/fphy.2020.567800>

14. Petringa G., Romano F., Manti L., et al. Radiobiological quantities in proton-therapy: Estimation and validation using Geant4-based Monte Carlo simulations. *Phys. Med.* 2019;58:72–80. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.01.018>
15. Troshina M.V., Koryakina E.V., Potetnya V.I., Koryakin S.N., Pikalov V.A., Antipov Yu.M. Induction of chromosome aberrations in B14-150 cells following carbon ions irradiation at low doses. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2020;1701:012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012029>
16. Kyriakou I., Sakata D., Tran H.N., et al. Review of the Geant4-DNA simulation toolkit for radiobiological applications at the cellular and DNA level. *Cancers.* 2022;14(1):35. <https://doi.org/10.3390/cancers14010035>
17. Chatzipapas K., Dordevic M., Zivkovic S., et al. Geant4-DNA simulation of human cancer cells irradiation with helium ion beams. *Phys. Med.* 2023;112:102613. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2023.102613>
18. Pisciotto P., Cammarata F.P., Stefano A., et al. Monte Carlo GEANT4-based application for *in vivo* RBE study using small animals at LNS-INFN preclinical hadrontherapy facility. *Phys. Med.* 2018;54:173–178. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.07.003>
19. Taha E., Djouider F., Banoqitah E. Monte Carlo simulations for dose enhancement in cancer treatment using bismuth oxide nanoparticles implanted in brain soft tissue. *Australas. Phys. Eng. Sci. Med.* 2018;41:363–370. <https://doi.org/10.1007/s13246-018-0633-z>
20. Cadini F., De Sanctis J., Girotti T., Zio E., Luce A., Taglioni A. Monte Carlo-based assessment of the safety performance of a radioactive waste repository. *Reliability Engineering & System Safety (RESS)*. 2010;95(8):859–865. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.04.002>
21. Geng C., Tang X., Gong C., Guan F., Johns J., Shu D., Chen D. A Monte Carlo-based radiation safety assessment for astronauts in an environment with confined magnetic field shielding. *J. Radiol. Prot.* 2015;35(4):777. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/35/4/777>
22. Archer J.W., Large M.J., Bolst D., et al. A multiscale nanodosimetric study of GCR protons and alpha particles in the organs of astronauts on the lunar surface *Rad. Phys. Chem.* 2025;229:112448. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112448>
23. Chernukha A.E., Saburov V.O., Adarova A.I., Solovev A.N., Kizilova Yu.V., Koryakin S.N. Three-Dimensional Models and Complimentary Geometry for Dose Evaluation in NG-24MT Based Neutron Radiotherapy Cabinet. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika.* 2022;3:158–167 (in Russ.). <https://doi.org/10.26583/npe.2022.3.14>
24. Koryakin S., Isaeva E., Beketov E., Solovev A., Ulyanenko L., Fedorov V., Lityaev V., Ulyanenko S. The photon capture therapy model for *in vivo* and *in vitro* studies using Au nanocomposites with the hyaluronic acid based compounds. *RAD Journal.* 2017;2(2):86–89. <http://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.019>
25. Solovyev A.N., Fedorov V.V., Kharlov V.I., Stepanova U.A. Comparative analysis of MCNPX and GEANT4 codes for fast-neutron radiation treatment planning. *Nuclear Energy Technol.* 2015;1(1):14–19. <https://doi.org/10.1016/j.nucet.2015.11.004>
26. Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Koryakin S.N. *A Software Toolkit for DICOM Medical Standard Images Conversion to Rapid Access Formats*: computer program. Registration number (certificate) 2023685423 RF. Publ. 27.11.2023 (in Russ.).
27. Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Chernukha A.E., Merzlikin G.V., Koryakin S.N. *Software Toolkit for General-Purpose Phase Space Conversion to Rapid Access Formats*: computer program. Registration number (certificate) 2024660249 RF. Publ. 03.05.2024 (in Russ.).
28. Solovev A.N., Kizilova Ya.V., Zverev V.I., Presnyakov A.Yu., Koryakin S.N. *A Supplementary Tool for Visual-Based Verification of Cross-Section of Collimator Slice with Patient Body in the Pre-Treatment Stage*: computer program. Registration number (certificate) 2024665975 RF. Publ. 09.07.2024 (in Russ.).
29. Solovev A.N., Chernukha A.E., Koryakin S.N., Presnyakov A.Yu., Zverev V.I. *Automated Optimization Tool for Fast Neutron Therapy Using 3D-CRT Regime by Root Mean Square Deviation with Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno Algorithm Implemented in Pytorch*: computer program. Registration number (certificate) 2024664787 RF. Publ. 09.07.2024 (in Russ.).
30. Butenko A.V., Syresin E.M., Tyutyunnikov S.I., et al. Analysis of Metrological Provision Problems of a Test Stand for Testing Radio-Electronic Products for Resistance to Irradiation with High-Energy Heavy Ions. *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2019;16: 734–743. <https://doi.org/10.1134/S1547477119060098>
31. Brun R., Rademakers F. ROOT — An object oriented data analysis framework. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 1997;389(1–2):81–86. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(97\)00048-X](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(97)00048-X)
32. Gordon K.B., Saburov V.O., Koryakin S.N., et al. Calculation of the Biological Efficiency of the Proton Component from 14.8 MeV Neutron Irradiation in Computational Biology with Help of Video Cards. *Bull. Exp. Biol. Med.* 2022;173:281–285. <https://doi.org/10.1007/s10517-022-05534-y>
[Original Russian Text: Gordon K.B., Saburov V.O., Koryakin S.N., Gulidov I.A., Fatkhudinov T.Kh., Arutyunyan I.V., Kaprin A.D., Solov'ev A.N. Calculation of the Biological Efficiency of the Proton Component from 14.8 MeV Neutron Irradiation in Computational Biology with Help of Video Cards. *Byulleten' eksperimental'noi biologii i meditsiny.* 2022;173(2):263–267 (in Russ.). <https://doi.org/10.47056/0365-9615-2022-173-2-263-267>]
33. Schneider W., Bortfeld T., Schlegel W. Correlation between CT numbers and tissue parameters needed for Monte Carlo simulations of clinical dose distributions *Phys. Med. Biol.* 2000;45(2):459. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/45/2/314>
34. Kotb O.M., Solovev A.N., Saburov V.O., et al. Response of the FBX aqueous chemical dosimeter to high energy proton and electron beams used for radiotherapy research. *Radiat. Phys. Chem.* 2024;216:111451. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.111451>

35. Balakin V.E., Bazhan A.I., Alexandrov V.A., et al. Updated Status of Protom Synchrotrons for Radiation Therapy. In: *27 Russian Particle Acc. Conf. (Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia). J. Accelerator Conferences Website (JACoW) Publishing*. 2021. P. 120–123. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB05>
36. Yuzhakov V.V., Korchagina K.S., Fomina N.K., Koryakin S.M., Solovov A.N., Ingel I.E., Koretskaya A.E., Sevankaeva L.E., Yakovleva N.D., Tsyganova M.G. Effect of gamma-radiation and scanning proton beam on the morphofunctional characteristics of rat sarcoma M-1. *Radiatsiya i risk = Radiation and Risk*. 2020;29(2):101–114 (in Russ.). <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-2-101-114>
37. Solovov A.N., Chernukha A.E., Potetnya V.I. *The Radiobiological Experiments Decision Making Support System for Temporary Radiobiological Stand of the U-70 Accelerator Facility*: computer program. Registration number (certificate) 2020615172 RF. Publ. 18.05.2020 (in Russ.).
38. Beketov E., Isaeva E., Malakhov E., Nasedkina N., Koryakin S., Ulyanenko S., Solovov A., Lychagin A. The study of biological effectiveness of U-70 accelerator carbon ions using melanoma B-16 clonogenic assay. *RAD Journal*. 2017;2(2): 90–93. <https://doi.org/10.21175/RadJ.2017.02.020>
39. Solovov A.N., Chernukha A.E., Troshina M.V., Lychagin A.A. Pikalov V.A., Kharlov V.I. Design of passive beam modifiers in carbon ion beam at U-70 synchrotron facility for radiobiological studies. *Meditinskaya Fizika = Medical Physics*. 2016;4(72):47–54 (in Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=27428891>
40. Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Smirnova E.N., et al. Assessment of the Biological Efficiency of 450 MeV/Nucleon Accelerated Carbon Ions in the U-70 Accelerator According to the Criterion of Mouse Survival. *BIOPHYSICS*. 2019;64: 991–998. <https://doi.org/10.1134/S000635091906023X>
[Original Russian Text: Zaichkina S.I., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Dyukina A.R., Belyakova T.A., Strelnikova N.S., Sorokina S.S., Pikalov V.A. Assessment of the Biological Efficiency of 450 MeV/Nucleon Accelerated Carbon Ions in the U-70 Accelerator According to the Criterion of Mouse Survival. *Biofizika*. 2019;64(4):1208–1215 (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.1134/S0006302919060206>]
41. Kuznetsova E.A., Sirota N.P., Mitroshina I.Yu., Pikalov V.A., Smirnova E.N., Rozanova O.M., Glukhov S.I., Sirota T.V., Zaichkina S.I. DNA damage in blood leukocytes from mice irradiated with accelerated carbon ions with an energy of 450 MeV/nucleon. *Int. J. Radiat. Biol.* 2020;96(10):1245–1253. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1807640>
42. Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P. The Results Obtained on “Radiobiological Stand” Facility, Working with the Extracted Carbon Ion Beam of the U-70 Accelerator. In: *27 Russian Particle Acc. Conf. (Proc. RuPAC'21, Alushta, Russia). J. Accelerator Conferences Website (JACoW) Publishing*. 2021. P. 124–126. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06>
43. Garkusha V.I., Ivanov S.V., Kalinin V.A., et al. Status of work on creating carbon ion beam channels for radiobiological and preclinical studies at the U-70 accelerator complex. *Instrum. Exp. Tech.* 2024;64(Suppl.2):S256–S241. <https://doi.org/10.1134/S0020441224701768>
[Original Russian Text: Garkusha V.I., Ivanov S.V., Kalinin V.A., Maksimov A.V., Markin A.M., Novoskol'tsev F.N., Pikalov V.A., Soldatov A.P., Sinyukov R.Yu. Status of work on creating carbon ion beam channels for radiobiological and preclinical studies at the U-70 accelerator complex. *Priory i tekhnika eksperimenta*. 2024;8(S2):14 (in Russ.).]
44. Meffe G., Votta C., Turco G., Chillè E., et al. Impact of data transfer between treatment planning systems on dosimetric parameters. *Phys. Med.* 2024;121:103369. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103369>
45. Mosleh Shirazi M.A., Faghihi R., Siavashpour Z., Nedaie H.A., Mehdizadeg S., Sina S. Independent evaluation of an *in-house* brachytherapy treatment planning system using simulation, measurement and calculation methods. *J. Appl. Clin. Med. Phys.* 2012;13(2):103–112. <https://doi.org/10.1120/jacmp.v13i2.3687>
46. Kumada H., Takada K., Aihara T., Matsumura A., Sakurai H., Sakae T. Verification for dose estimation performance of a Monte-Carlo based treatment planning system in University of Tsukuba. *Appl. Radiat. Isot.* 2021;166:109222. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109222>
47. Moyers M.F., Lin J., Li J., Chen H., Shen Z. Optimization of the planning process with an *in-house* treatment information, management, and planning system. *Radiat. Med. Protect.* 2022;3(3):102–107. <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2022.07.004>
48. Shao Y., Gui J., Wang J., et al. Novel *in-house* knowledge-based automated planning system for lung cancer treated with intensity-modulated radiotherapy. *Strahlenther. Onkol.* 2023;200(11):967–982. <https://doi.org/10.1007/s00066-023-02126-1>
49. Guo Y., Liu Z., Feng S., Cai H., Zhang Q. Clinical Viability of an Active Spot Scanning Beam Delivery System with a Newly Developed Carbon-Ion Treatment Planning System. *Adv. Radiat. Oncol.* 2024;9(7):101503. <https://doi.org/10.1016/j.adro.2024.101503>
50. Kalyganova N.V., Kiselev V.A., Kashentseva N.V., Udalov Yu.D., Gritsenko S.E. Comparison of dosimetric properties of proton and intensity modulated radiotherapy for glioblastomes. In: *Il'inskie chteniya 2022: Proceedings of the School-Conference of Young Scientists and Specialists*. Moscow, 2022. P. 141–142 (in Russ.). <https://elibrary.ru/item.asp?id=49488724>
51. Okada S., Murakami K., Amako K., et al. GPU Acceleration of Monte Carlo Simulation at the Cellular and DNA Levels. In book series: Chen Y.W., Torro C., Tanaka S., Howlett R. (Eds.). *Innovation in Medicine and Healthcare 2015. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Springer; 2016. V. 45. P. 323–332. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-23024-5_29
52. Okada S., Murakami K., Incerti S., Amako K., Sasaki T. MPEXS-DNA, A new GPU-based Monte Carlo simulator for track structure and radiation chemistry at subcellular scale. *Med. Phys.* 2019;46(3):1483–1500. <https://doi.org/10.1002/mp.13370>
53. Qin N., Shen C., Tasi M.Y., et al. Full Monte Carlo–Based Biologic Treatment Plan Optimization System for Intensity Modulated Carbon Ion Therapy on Graphics Processing Unit. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2018;100(1):235–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2017.09.002>

54. Franciosini G., Carlotti D., Cattani F., et al. IOeRT conventional and FLASH treatment planning system implementation exploiting fast GPU Monte Carlo: The case of breast cancer. *Phys. Med.* 2024;121:103346. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2024.103346>
55. Magro G., Mein S., Kopp B., et al. FROG dose computation meets Monte Carlo accuracy for proton therapy dose calculation in lung. *Phys. Med.* 2021;88:66–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2021.05.021>
56. Yagi M., Tsubouchi T., Hamatani N., Takashina M., Maruo H., Fujitaka S., et al. Commissioning a newly developed treatment planning system, VQA Plan, for fast-raster scanning of carbon-ion beams. *PLoS ONE*. 2022;17(5):e0268087. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268087>
57. Lu Y., Sigov A., Ratkin L., Ivanov L.A., Zuo M. Quantum computing and industrial information integration: A review. *J. Ind. Inform. Integr.* 2023;35:100511. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2023.100511>
58. Giraud P., Bibault J.E. Artificial intelligence in radiotherapy: Current applications and future trends. *Diagn. Interv. Imaging.* 2024;105(12):475–480. <https://doi.org/10.1016/j.diii.2024.06.001>

Об авторах

Соловьев Алексей Николаевич, к.ф.-м.н., заведующий лабораторией медицинской радиационной физики отдела радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10); доцент, кафедра радионуклидной медицины, Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (249039, Россия, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», тер. Студгородок, д. 1). E-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru. Scopus Author ID 57215856302, ResearcherID O-6340-2014, <https://orcid.org/0000-0002-4386-3725>

Кизилова Яна Владимировна, научный сотрудник, лаборатория медицинской радиационной физики отдела радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10). E-mail: cobaltcorsair@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0001-0404-820X>

Казаков Евгений Игоревич, инженер, лаборатория разработки и эксплуатации облучающей техники отдела радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10). E-mail: ekazakof@ya.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4178-6242>

Корякин Сергей Николаевич, к.б.н., заведующий отделом радиационной биофизики, Медицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский центр радиологии» Минздрава Российской Федерации (249031, Россия, Калужская область, Обнинск, ул. Маршала Жукова, д. 10); доцент, кафедра радионуклидной медицины, Обнинский институт атомной энергетики — филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (249039, Россия, Калужская область, городской округ «Город Обнинск», тер. Студгородок, д. 1). E-mail: korsernic@mail.ru. Scopus Author ID 6603357340, <https://orcid.org/0000-0003-0128-4538>

About the Authors

Aleksei N. Solovev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of Medical Radiation Physics, Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia); Associate Professor, Radionuclide Medicine Department, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga oblast, 249039 Russia). E-mail: salonf@mrrc.obninsk.ru. Scopus Author ID 57215856302, ResearcherID O-6340-2014, <https://orcid.org/0000-0002-4386-3725>

Yana V. Kizilova, Researcher, Laboratory of Medical Radiation Physics, Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia). E-mail: cobaltcorsair@yandex.ru. <https://orcid.org/0009-0001-0404-820X>

Evgeniy I. Kazakov, Engineer, Laboratory of Development and Operation of Radiation Equipment, Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia). E-mail: ekazakof@ya.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4178-6242>

Sergey N. Koryakin, Cand. Sci. (Biol.), Head of Radiation Biophysics Department, A. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center (10, Marshala Zhukova ul., Obninsk, Kaluga oblast, 249031 Russia); Associate Professor, Radionuclide Medicine Department, Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga oblast, 249039 Russia). E-mail: korsernic@mail.ru. Scopus Author ID 6603357340, <https://orcid.org/0000-0003-0128-4538>