

DOI: 10.21294/1814-4861-2026-25-1-95-106  
УДК: 616-006-08:615.849.12



Для цитирования: Селихова Е.А., Сагов И.Р., Сухих Е.С., Стахова О.М., Грибова О.В., Великая В.В., Старцева Ж.А., Бразовский К.С., Конев А.В., Сутыгина Я.Н. Создание базы данных клинически значимых радиобиологических показателей опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной терапии. Сибирский онкологический журнал. 2026; 25(1): 95–106. – doi: 10.21294/1814-4861-2026-25-1-95-106

For citation: Selikhova E.A., Sagov I.R., Sukhikh E.S., Stakhova O.M., Gribova O.V., Velikaya V.V., Startseva Zh.A., Brazovsky K.S., Konev A.V., Sutygina Ya.N. Creation of a database of radiobiological parameters of tumors and normal tissues based on clinical data of photon and neutron radiation therapy. Siberian Journal of Oncology. 2026; 25(1): 95–106. – doi: 10.21294/1814-4861-2026-25-1-95-106

## СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ КЛИНИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОПУХОЛЕЙ И НОРМАЛЬНЫХ ТКАНЕЙ ДЛЯ ФОТОННОЙ И НЕЙТРОННОЙ ТЕРАПИИ

Е.А. Селихова<sup>1</sup>, И.Р. Сагов<sup>1,2</sup>, Е.С. Сухих<sup>1,3</sup>, О.М. Стахова<sup>1,2</sup>, О.В. Грибова<sup>3</sup>,  
В.В. Великая<sup>3</sup>, Ж.А. Старцева<sup>3</sup>, К.С. Бразовский<sup>1</sup>, А.В. Конев<sup>1</sup>,  
Я.Н. Сутыгина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
Россия, 634050, г. Томск, пр-т Ленина, 30

<sup>2</sup>ГАУЗ ТО «МКМЦ «Медицинский город»  
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Барнаульская, 32

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный  
исследовательский медицинский центр Российской академии наук  
Россия, 634009, г. Томск, пер. Кооперативный, 5

### Аннотация

**Актуальность.** Лучевая терапия является одним из основных методов лечения злокачественных новообразований, эффективность которого зависит от соотношения доз излучения, поглощенных опухолевыми и здоровыми клетками. Качество дозиметрического плана традиционно оценивается на основе физико-дозиметрических критериев, однако для достижения максимального прогнозируемого терапевтического эффекта необходимо учитывать радиобиологические аспекты. Существующее разнообразие радиобиологических моделей и отсутствие единого подхода к систематизации их численных параметров затрудняют их практическое применение, что делает актуальной задачу создания специализированной базы данных. **Цель исследования** – разработка базы данных клинически значимых радиобиологических показателей опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной терапии как единого специализированного инструмента для повышения точности дозиметрического планирования и прогнозирования клинических результатов лечения злокачественных новообразований. **Материал и методы.** Проведен анализ более 100 научных работ из открытых источников, посвященных расчетам клинически значимых радиобиологических показателей широко используемых радиобиологических моделей. В ходе исследования данные систематизированы с учетом различных режимов фракционирования, энергии и вида излучения, методик лучевой терапии, локализации и объема области облучения, а также индивидуальных особенностей пациентов. **Результаты.** Создана база данных клинически значимых радиобиологических показателей для фотонной и нейтронной терапии. На основе структурированных данных разработано веб-приложение с использованием языков программирования Python и JavaScript. Веб-приложение интегрировано в программное обеспечение «Калькулятор TCP/NTCP» и обеспечивает возможность хранения, быстрого поиска и анализа радиобиологических показателей. **Заключение.** Созданная база данных систематизирует клинически значимые радиобиологические показатели и предоставляет специалистам единый инструмент для прогнози-

вания вероятного результата лечения и оценки риска нежелательных последствий для критических органов и тканей. Данный инструмент может применяться в клинической практике, образовательных программах для подготовки специалистов в области медицинской физики и лучевой терапии, а также для углубленного изучения радиобиологических эффектов и разработки новых методов лечения.

**Ключевые слова:** база данных, фотонная терапия, нейтронная терапия, радиобиологические параметры, радиобиологические модели, радиобиологические показатели.

## CREATION OF A DATABASE OF RADIOBIOLOGICAL PARAMETERS OF TUMORS AND NORMAL TISSUES BASED ON CLINICAL DATA OF PHOTON AND NEUTRON RADIATION THERAPY

E.A. Selikhova<sup>1</sup>, I.R. Sagov<sup>1,2</sup>, E.S. Sukhikh<sup>1,3</sup>, O.M. Stakhova<sup>1,2</sup>, O.V. Gribova<sup>3</sup>, V.V. Velikaya<sup>3</sup>, Zh.A. Startseva<sup>3</sup>, K.S. Brazovsky<sup>1</sup>, A.V. Konev<sup>1</sup>, Ya.N. Sutygina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University  
30, Lenin Ave., Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup>Multidisciplinary clinical medical center "Medical city"  
32, Barnaulskaya St., Tyumen, 625000, Russia

<sup>3</sup>Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences  
5, Kooperativny St., Tomsk, 634009, Russia

### Abstract

**Background.** Radiotherapy is one of the primary methods for treating malignant neoplasms, and its effectiveness depends on the ratio of radiation doses absorbed by tumor and healthy cells. The quality of a dosimetric plan is traditionally assessed based on physical and dosimetric criteria; however, radiobiological aspects should be taken into account to achieve the maximum predicted therapeutic effect. The existing variety of radiobiological models and the lack of a unified approach to systematizing their numerical parameters hinder their practical application, making the creation of a specialized database a relevant task. **Objective:** to develop a database of clinically significant radiobiological parameters for tumors and normal tissues for photon and neutron therapy as a unified specialized tool to improve the accuracy of dosimetric planning and predict clinical treatment outcomes for malignant neoplasms. **Material and Methods.** An analysis of more than 100 scientific publications from open sources dedicated to the calculation of clinically significant radiobiological parameters of widely used radiobiological models was conducted. During the study, data were systematized considering various fractionation regimens, radiation energy and type, radiotherapy techniques, localization and volume of the irradiated area, as well as individual patient characteristics. **Results.** A database of clinically significant radiobiological parameters for photon and neutron therapy was created. Based on the structured data, a web application was developed using the Python and JavaScript programming languages. The web application is integrated into the "TCP/NTCP Calculator" software and provides capabilities for storage, rapid search, and analysis of radiobiological parameters. **Conclusion.** The created database systematizes clinically significant radiobiological parameters and provides specialists with a unified tool for predicting probable treatment outcomes and assessing the risk of adverse effects on critical organs and tissues. This tool can be used in clinical practice, educational programs for training specialists in medical physics and radiotherapy, as well as for the in-depth study of radiobiological effects and the development of new treatment methods.

**Key words:** database, photon radiation therapy, neutron radiation therapy, radiobiologic parameters, radiobiologic models.

### Введение

Лучевая терапия (ЛТ) является одним из наиболее распространенных и эффективных методов лечения злокачественных новообразований. Клиническая результативность этого метода во многом зависит от соотношения доз излучения, поглощенных опухолевыми и здоровыми клетками.

Процесс дозиметрического планирования направлен на поиск оптимального распределения поглощенной дозы в теле пациента. Качество дозиметрического плана традиционно оценивается на

основе физико-дозиметрических критериев, таких как анализ распределения изодозовых линий, гистограммы «доза-объем» (ГДО) и расчет индексов конформности и однородности. Однако для достижения максимального прогнозируемого терапевтического эффекта при минимальном прогнозируемом повреждении нормальных тканей необходимо учитывать радиобиологические аспекты.

Прогнозируемый радиобиологический ответ зависит как от физико-дозиметрических параметров (вид и энергия излучения, методика ЛТ, суммарная

доза, режим фракционирования, локализация и объем области облучения, распределение поглощенной дозы в облучаемом объеме), так и от индивидуальных особенностей пациента (радиочувствительность, физиологический статус, сопутствующие заболевания) [1]. Для комплексного учета этих факторов и количественного прогнозирования исхода лечения применяются радиобиологические модели.

Благодаря достижениям в диагностике злокачественных новообразований и совершенствованию методик облучения возрастает роль радиобиологической оптимизации (РО) дозиметрических планов. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость анализа и учета клинически значимых показателей, лежащих в основе радиобиологических моделей.

Радиобиологические модели позволяют количественно прогнозировать влияние облучения на опухоль и нормальные ткани, рассчитывать поглощенную дозу, количество фракций в курсе лечения, а также оценивать биологический эффект облучения при разных режимах фракционирования. Следовательно, понимание биологического смысла и естественной вариабельности клинически значимых радиобиологических показателей, входящих в различные модели, становится критически важной составляющей прогнозирования радиобиологического ответа.

Однако существующее разнообразие радиобиологических моделей и отсутствие единого подхода к систематизации их численных параметров затрудняют их практическое применение [2]. Как следствие, актуальной задачей в современной радиобиологии и лучевой терапии является создание специализированной базы данных, охватывающей ключевые клинически значимые показатели радиобиологических моделей для фотонной и нейтронной терапии. Создание такой базы данных позволит повысить качество прогнозирования результатов лечения, оптимизировать индивидуальные дозиметрические планы ЛТ, систематизировать существующие численные значения, а также упростит доступ к информации для научных исследований и образовательных целей.

### Материал и методы

Радиобиологические модели в ЛТ представляют собой теории, которые предсказывают эффекты ионизирующего излучения на опухолевые и нормальные ткани организма [3]. Эти модели, опирающиеся на математические расчеты, позволяют рассчитывать величину разовой поглощенной дозы, количество фракций в курсе лечения и оценить реакцию отдельных клеток на облучение. В клинической практике расчет дозы излучения и числа фракций в курсе лечения обеспечивает подведение к опухоли дозы, достаточной для ее уничтожения, при сохранении жизнеспособности и физиологиче-

ской функции нормальных тканей и органов. Кроме того, радиобиологические модели позволяют сравнивать биологический эффект облучения при различных режимах фракционирования.

В фотонной терапии (ФТ) широко используются модели для преобразования физических величин, таких как поглощенная доза, в клинически значимые показатели, например: биологически эффективная доза (BED – Biologically Effective Dose), вероятность локального контроля над опухолью (TCP – Tumor Control Probability) и вероятность возникновения осложнений в нормальных тканях (NTCP – Normal Tissue Complication Probability). Эти показатели являются ключевыми в оптимизации планов облучения и индивидуализации лечения пациентов.

Выживаемость опухолевых клеток описывается кривой доза-эффект или кривой выживаемости. Самой простой и понятной моделью для описания кривой доза-эффект является линейно-квадратичная модель [4]. Данная модель зависит от экспоненциальной функции с линейно-квадратичным показателем и выражается как

$$SF(D) = \exp(-\alpha D - \beta D^2), \quad (1)$$

где  $SF(D)$  – доля выживших клеток после облучения поглощенной дозой  $D$ ;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, специфичные для разных органов.

В современной ЛТ все больше применяются нестандартные подходы к фракционированию лечебной дозы излучения. Линейно-квадратичная модель (ЛКМ) позволяет легко перевести поглощенную дозу в нестандартном фракционировании в стандартное фракционирование в 2 Гр за фракцию. Данный параметр – это эквивалентная доза по 2 Гр за фракцию ( $EQD_2$  – Equivalent Dose in 2 Gy) и выводится из отношения BED [5] референсного режима фракционирования (режима фракционирования, который требуется преобразовать в классический) и классического (по 2 Гр за фракцию):

$$BED = D \left( 1 + \frac{d}{\alpha/\beta} \right), \quad (2)$$

$$\frac{D \left( 1 + \frac{d}{\alpha/\beta} \right)}{D_2 \left( 1 + \frac{2}{\alpha/\beta} \right)} \Rightarrow EQD_2 = D \left( \frac{d + \alpha/\beta}{2 + \alpha/\beta} \right), \quad (3)$$

где  $D$  – полная поглощенная доза, Гр;  $d$  – доза за фракцию, Гр.

Именно ЛКМ, в большинстве случаев, используется для описания эффектов от нестандартных подходов к фракционированию поглощенной дозы. И отношение  $\alpha/\beta$  является ключевым параметром в данной модели для описания этих эффектов. Данный параметр выражает поглощенную дозу, при которой число клеток с ранним летальным исходом равно числу клеток с поздним летальным исходом. В большинстве случаев, в среднем, для опухолей

и рано реагирующих нормальных тканей  $\alpha/\beta$  составляет 10 Гр, для поздно реагирующих нормальных тканей – 3 Гр. Тем не менее данный параметр может варьироваться как для опухолей, так и для нормальных тканей, как среди населения, так и для индивидуального пациента в течение курса ЛТ.

Многие исследователи сделали огромный вклад в радиобиологическую оценку ЛТ. В открытых источниках можно найти различные подходы для расчета вероятности контроля опухоли и осложнения в нормальных тканях [6–14].

*Модели вероятности контроля опухоли для ФЛТ*

Большинство математических моделей *TCP* основаны на том, что число выживших клоногенных клеток (клеток, способных воспроизвести колонию), подчиняются распределению Пуассона. Одной из главных гипотез в вычислении вероятности контроля опухоли является то, что для продолжения роста опухоли достаточно одного жизнеспособного клоногена. Поэтому *TCP* можно выразить как [6]

$$TCP = \exp(-SN), \tag{4}$$

где  $N$  – общее количество клоногенных клеток;  $S$  – выжившая фракция клеток после облучения; тогда  $SN$  – это среднее число выживших клоногенов.

А для практического применения на основе математического распределения поглощенной дозы *TCP* можно выразить как [7]

$$TCP = \prod_i^M P(D_i)^{v_i}, \tag{5}$$

где  $M$  – число вокселей (элементарный объем изображения);  $v_i = V_i / V_{ref}$  – относительный объем вокселя.

Для практических расчетов используются интервалы дифференциальной ГДО ( $D_i, v_i$ ).

Некоторые *TCP* модели описываются логистической функцией, например, Р. Okunieff et al. [8] использовали следующее выражение:

$$P(D_i) = \frac{\exp [(D_i - TCD_{50})/k]}{1 + \exp [(D_i - TCD_{50})/k]}, \tag{6}$$

где  $k$  связано с нормированным градиентом доза-ответ;  $k = TCD_{50} / 4\gamma_{50}$ ;  $TCD_{50}$  – доза ЛТ, необходимая для контроля 50 % объема равномерно облучаемой опухоли, Гр;  $\gamma_{50}$  – параметр ЛКМ, специфичный для опухоли и определяющий наклон кривой доза-ответ как тангенс угла этого наклона. Наглядное объяснение этих параметров приведено на рис. 1.

Эмпирическую логистическую функцию в своих моделях также используют Н.А. Gay, А. Niemierko [9], и выглядит она следующим образом:

$$TCP = \frac{1}{(1 + \frac{TCD_{50}}{EUD})^{4\gamma_{50}}}, \tag{7}$$

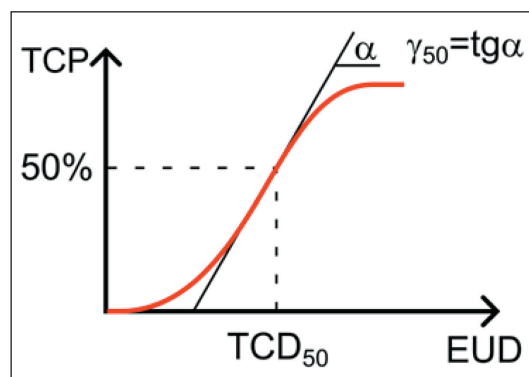


Рис. 1. Определение параметров  $TCD_{50}$  и  $\gamma_{50}$ .  
Примечание: рисунок выполнен авторами  
Fig. 1. Definition of parameters  $TCD_{50}$  and  $\gamma_{50}$ .  
Note: created by the authors

где *EUD* [10] – однородная эквивалентная доза, Гр.

Как можно заметить, модель *TCP* Немирко основана на эквивалентной однородной дозе (*EUD*). Данная концепция делает эту модель простой в практическом применении, так как она не требует больших математических вычислений. Функция *EUD* вычисляется следующим выражением:

$$EUD = (\sum_{i=1} v_i D_i^a)^{1/a}, \tag{8}$$

где  $v_i$  – относительный объем, представляющий собой частичный  $i$ -й объем, который получает поглощенную дозу в абсолютном выражении (Гр). Поскольку относительный объем всей интересующей структуры соответствует 1, сумма всех частичных объемов будет равна 1. Параметр  $a$  – это безразмерный параметр модели, который специфичен для определенного органа или мишени.

*Модели вероятности осложнения в нормальных тканях при ФЛТ*

Одна из самых простых моделей вероятности осложнения в нормальных тканях была предложена тем же Немирко [9]. Модель *NTCP* на базе *EUD* выглядит следующим образом:

$$NTCP = \frac{1}{(1 + \frac{TD_{50}}{EUD})^{4\gamma_{50}}}, \tag{9}$$

где  $TD_{50}$  – поглощенная доза, которая при равномерном распределении по всему объему органа с вероятностью 50 %, вызовет осложнения в нормальных тканях (Гр).

Данная модель также основывается на концепте *EUD*. Параметр является специфичным для каждого органа. Здесь стоит отметить, что данный параметр для органов риска имеет отрицательные значения.

Еще одним подходом к расчету вероятности осложнений в нормальных тканях является модель Лаймана–Катчера–Бермана (ЛКВ модель) [11], которая основана на работе Лаймана [12]. Ключевым

ограничением модели Лаймана являлось предположение о равномерности облучения, тогда как в клинической практике нормальные ткани и органы обычно подвергаются неоднородному воздействию. В связи с этим были разработаны алгоритмы, преобразующие неоднородное распределение поглощенной дозы в однородное. Наибольшее признание получил алгоритм Лаймана–Катчера–Бермана, представленный в более доступной интерпретации, предложенной Моханом в 1992 г. [13]. Согласно данной формулировке, выражение  $NTCP$  в модели ЛКВ выглядит следующим образом:

$$NTCP = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (10)$$

$$t = \frac{D_{eff} - TD_{50}}{mTD_{50}}, \quad (11)$$

$$D_{eff} = (\sum_i v_i D_i^{1/z})^z, \quad (12)$$

где  $D_{eff}$  – поглощенная доза, которая при равномерном распределении по всему объему приведет к такому же значению  $NTCP$ , как и фактическое неравномерное распределение поглощенной дозы, Гр;  $m$  – параметр наклона сигмоидной кривой выживаемости клеток;  $z$  – безразмерный параметр, специфичный для каждого органа. Стоит отметить, что  $D_{eff}$  концептуально идентична  $EUD$  с параметром  $\alpha = 1/z$ . Для учета различий в поглощенной дозе за фракцию принято заменять  $D_i$  эквивалентной дозой, доставляемой фракциями по 2 Гр,  $EQD_2$ .

Вероятность осложнения в нормальных тканях как для последовательной, так и для параллельной архитектуры строения органа описывает модель Келлмана [14]. Относительный вклад каждого типа архитектуры органа описывается параметром  $s$ , который равен единице для полностью последовательной архитектуры органа и нулю для полностью параллельной архитектуры.  $NTCP$  задается следующим уравнением:

$$NTCP = \{1 - \prod_i [1 - P(D_i)^s]^{v_i}\}^{1/s}, \quad (13)$$

где  $P(D_i)$  – вероятность осложнения. Несмотря на то, что  $s$ -модель была разработана с использованием принципов механистической архитектуры тканей, на практике значения параметра  $s$ , найденные для обеспечения наилучшего соответствия клиническим данным, часто превышают теоретический максимум, равный единице, что побудило считать модель феноменологической [7].

#### *Радиобиологические аспекты нейтронной терапии*

Клинический опыт проведения терапии быстрыми нейтронами значительно меньше относительно опыта в ФТ [15], поэтому РО имеет особое значение. Терапия быстрыми нейтронами является способом повышения эффективности лечения

опухолей, резистентных к редко ионизирующему излучению, и ее часто сочетают с ФТ [16, 17].

Для предупреждения осложнений в нейтронной и нейтронно-фотонной терапии (НФТ) применяются модели «время – доза – фракционирование» (ВДФ) и ЛКМ, рассмотренные в работах [18] и [19] на циклотроне У-120 со средней энергией ~6,3 МэВ.

Модель (модификация концепции Ellis [20]) ВДФ в терапии пучком быстрых нейтронов циклотрона У-120 со средней энергией 6,3 МэВ в случае равномерного режима фракционирования дозы имеет вид [21]:

$$ВДФ = 6,9 N x d_n^{1,18} x^{-1,13}, \quad (14)$$

где  $d_n$  – однократная доза в терапии пучком быстрых нейтронов, Гр;  $N$  – число сеансов;  $x$  – средний временной интервал между сеансами, сут.

В планировании терапии быстрыми нейтронами, наряду с ЛКМ (формула 1), для предсказания реакции облучаемой ткани также применяется многомишенная модель (ММ) клеточной выживаемости [22]:

$$SF(D) = [1 - (1 - e^{-D/D_0})^n], \quad (15)$$

где  $SF(D)$  – доля выживших клеток после облучения поглощений дозой  $D$ ;  $D_0$  и  $n$  – радиобиологические параметры, характеризующие степень радиочувствительности клеток.

В качестве аналога фактора ВДФ в ЛКМ выступает «суммарный биологический эффект» [23]:

$$СЭ = d_n \cdot N \left( \frac{\alpha}{\beta} + d_n \right). \quad (16)$$

Поэтому выражение для однократных доз, соответствующих полным курсам нейтронной терапии при ежедневном облучении, на основе ЛКМ и с учетом  $\alpha_H/\beta_H = 45$  [25], СЭ (предел толерантности нормальных тканей) = 720 [24] имеет следующий вид [19]:

$$d_n = \frac{-45 \cdot N \cdot x / \beta + [(45 \cdot N \cdot x)^2 + 2880 \cdot N \cdot x]^{0,5}}{2 \cdot N \cdot x}. \quad (17)$$

Параметры линейно-квадратичной модели для терапевтического пучка быстрых нейтронов циклотрона У-120 со средней энергией 6,3 МэВ:  $\alpha_H = 1,03$  Гр<sup>-1</sup>;  $\beta_H = 0,023$  Гр<sup>-2</sup> [21], которые необходимы для расчета зависимости относительной биологической эффективности (ОБЭ) для быстрых нейтронов от поглощенной дозы, а правильное определение ОБЭ, в свою очередь, влияет на выбор эффективных и безопасных режимов облучения [25]. Формула для ОБЭ выглядит следующим образом [26]:

$$ОБЭ = - \frac{D_{0\gamma}}{D_n} \ln \left[ 1 - \left( 1 - \exp \left( - \frac{D_n}{D_{0n}} \right) \right)^{n_u/n_\gamma} \right], \quad (18)$$

где  $D_{0\gamma}$ ,  $D_{0H}$  и  $n$  – радиобиологические параметры, определяющие радиочувствительность облучаемой ткани для нейтронов и гамма-излучения;  $D_H$  – некоторая произвольная доза нейтронов;  $D_\gamma$  – поглощенная доза фотонного излучения.

ОБЭ зависит от энергии быстрых нейтронов (различные источники нейтронов) и лежит в пределах от 2 до 6 [15].

### Результаты

Перечень клинически значимых радиобиологических показателей, вошедших в разработанную базу данных, был составлен по результатам исследования более 100 работ из открытых источников. Работы, вошедшие в базу данных [27–59], идентифицированы из открытых источников с использованием электронных научных библиотек и поисковых систем Google Scholar, PubMed, Science Direct, ResearchGate с комбинациями поисковых терминов «neutron radiation therapy», «photon radiation therapy», «radiobiologic models», «tumor control probability», «normal tissue complication probability», «TCP, NTCP calculation» и др. Поиск включал статьи на русском и английском языках.

По клиническим факторам в исследование включались пациенты с любым типом опухоли, независимо от ее локализации, стадии и гистологии. Распределение по видам лучевой терапии: фотонная и нейтронная. Методика облучения: кон-

венциональная, 3D-конформная, лучевая терапия с модуляцией интенсивности фотонного излучения, объемно-модулированная лучевая терапия. Исследования должны были содержать расчетные значения  $\alpha$ ,  $\beta$  или  $\alpha/\beta$ ,  $EQD_2$ ,  $BED$ ,  $\gamma_{50}$ ,  $EUD$ ,  $TD_{50}$ ,  $ВДФ$ ,  $ОБЭ$ ,  $ТСР$ ,  $NTCP$ . Клиническая конечная точка (например, местный/локальный контроль, выживаемость, биохимический контроль), на которой основывались эти оценки, не ограничивалась. В случае терапии быстрыми нейтронами: исследования сочетанной ЛТ (НФТ), комбинированной (терапия быстрыми нейтронами после хирургического вмешательства), а также нейтрон-захватной включались как отдельные результаты.

Результатом данной работы стало веб-приложение «База данных радиобиологических параметров для фотонной и нейтронной лучевой терапии» [60] (языки программирования: Python, JavaScript) для сбора и структурирования большого объема данных радиобиологических показателей опухолей и нормальных тканей на основе клинических данных, которые могут быть использованы для прогнозирования результатов фотонной и нейтронной терапии. Схема БД представлена на рис. 2.

На данный момент БД включает клинически значимые радиобиологические показатели фотонной и нейтронной ЛТ. Фотонная ЛТ является наиболее распространенным видом ЛТ и поэтому привлекает внимание многих исследователей. Наиболее исследованными радиобиологическими

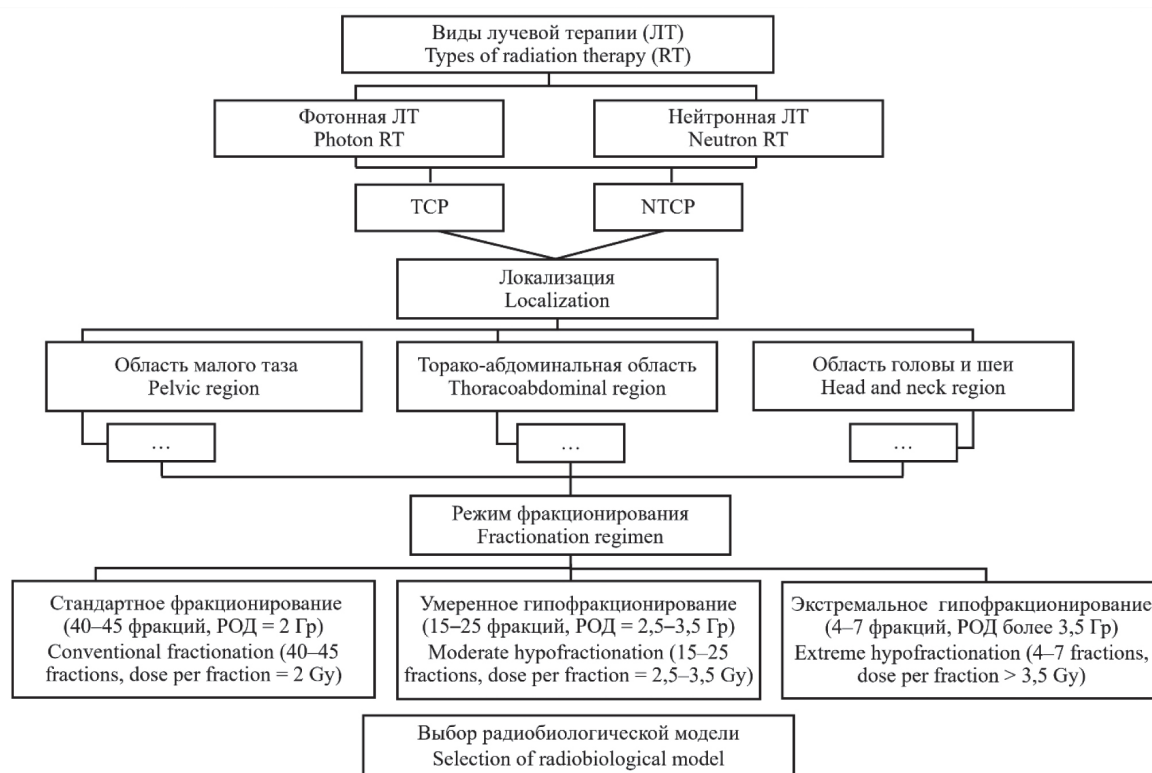


Рис. 2. Структура веб-приложения «База данных радиобиологических параметров опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной лучевой терапии». Примечание: рисунок выполнен авторами

Fig. 2. Structure of the web application "Database of radiobiological parameters of tumors and normal tissues for photon and neutron radiation therapy". Note: created by the authors

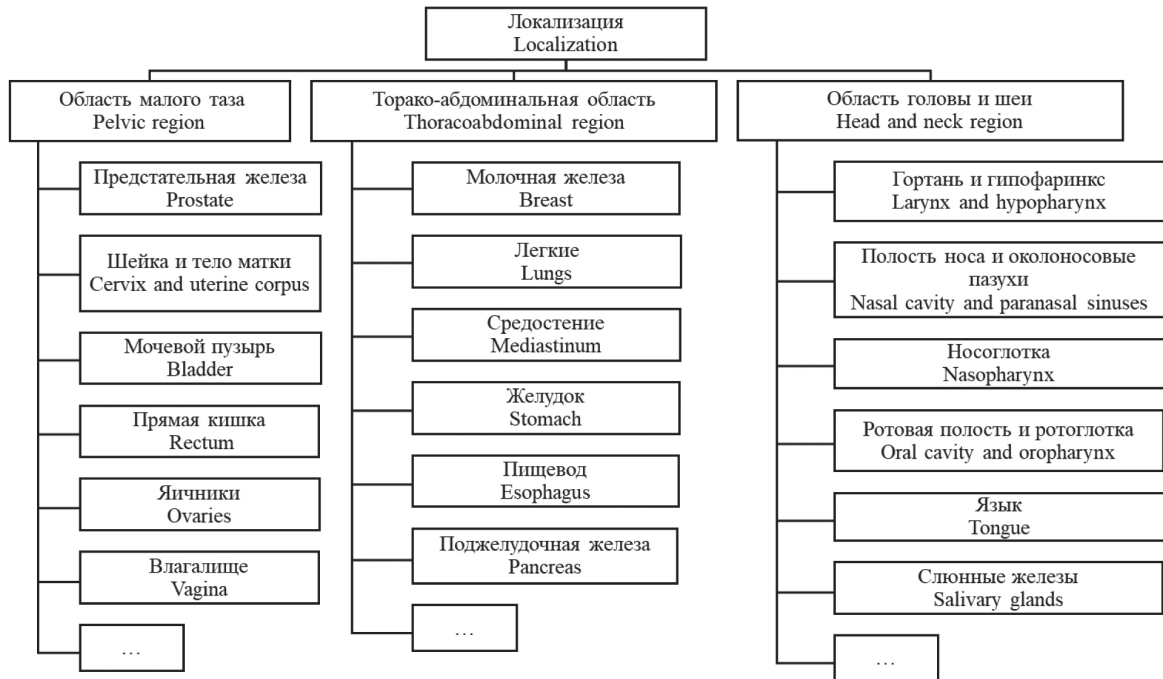


Рис. 3. Локализации с выпадающим списком опухолей и нормальных тканей в веб-приложении «База данных радиобиологических параметров опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной лучевой терапии».

Примечание: рисунок выполнен авторами

Fig. 3. Localizations with a drop-down list of tumors and normal tissues in the web application "Database of radiobiological parameters of tumors and normal tissues for photon and neutron radiation therapy". Note: created by the authors

показателями для фотонной ЛТ являются показатели моделей Пуассона [8] и Немирко [9] – для вероятности контроля опухоли; модели Лаймана–Катчера–Бермана [11] и Немирко [9] – для вероятности осложнения в нормальных тканях, поэтому радиобиологические показатели данных моделей включены в БД.

Для удобства пользования данной базой и быстроты поиска нужного радиобиологического показателя клинические данные разделены по трем локализациям с выпадающим списком типов опухолей и нормальных тканей (рис. 3). Также некоторые клинически значимые радиобиологические показатели разделены по режимам фракционирования, в которых они были получены: стандартный режим (разовая доза (РД) 2 Гр), умеренное гипофракционирование (РД 2,5–3,5 Гр) и экстремальное гипофракционирование (РД более 3,5 Гр).

Нейтронная ЛТ в данной работе представлена как дистанционная терапия на пучках быстрых нейтронов, где в качестве критериев для оценки эффективности описаны: локальный контроль над ростом опухоли (ТСР), относительная биологическая эффективность (ОБЭ), фактор «время – доза – фракционирование» (ВДФ), вероятность возникновения осложнений в нормальных тканях (НТСР), показатель выживаемости.

Все данные, приведенные в данной работе, ссылаются на открытые источники [27–59], эти источники также приведены в базе данных для более подробного ознакомления с интересующими параметрами.

Веб-приложение для работы с базой данных клинически значимых радиобиологических показателей опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной ЛТ интегрировано в программное обеспечение по расчету локального контроля над ростом опухоли и вероятности пострadiационных осложнений в нормальных тканях «Калькулятор ТСР/НТСР» [61], разработанное Томским политехническим университетом.

Права доступа пользователей разграничиваются следующим образом:

1. Роли пользователей (различные группы с определенными правами):

- администратор: доступ ко всем функциям приложения, включая управление пользователями и редактирование базы данных, но без права настройки приложения и изменения/удаления радиобиологических данных;

- исследователь/пользователь: доступ только к просмотру и анализу данных, без возможности их редактирования.

2. Авторизация (первичная регистрация, использование пароля) + интеграция с внешними системами (через ПО «Калькулятор ТСР/НТСР», свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664910 от 10.07.2023) – возможность использования внешней системы аутентификации.

3. Учет и анализ действий пользователей. Все действия пользователей, такие как «запрос на добавление, изменение или удаление данных», фиксируются.

## Заключение

Учет объемных характеристик опухоли и нормальных тканей при дозиметрическом планировании лучевой терапии повышает эффективность лечения и снижает риск развития побочных эффектов (радиационных осложнений). Основная цель создания базы данных клинически значимых радиобиологических показателей опухолей и нормальных тканей, а также ее интеграции в веб-приложение – предоставить специалистам единый инструмент для систематизированного хранения и использования радиобиологических данных, что позволит более точно прогнозировать исход лечения и оценивать риск нежелательных последствий для критически важных органов и тканей с учетом индивидуальных особенностей пациента. Разработанная база данных основана на анализе широкого спектра клинических исследований и включает

параметры, влияющие на радиобиологическую эффективность лечения как в фотонной, так и в нейтронной терапии. Программа обеспечивает выполнение следующих функций: хранение научных и клинических данных; быстрый поиск требуемой информации; обмен данных с программным обеспечением «Калькулятор TCP/NTCP». Кроме клинического применения, разработанный инструмент может использоваться в образовательных программах для подготовки и переподготовки специалистов в области медицинской физики и лучевой терапии, а также для углубленного изучения радиобиологических эффектов и разработки новых технологий и методов лечения. Веб-приложение «База данных радиобиологических параметров опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной лучевой терапии» постоянно обновляется и пополняется новыми данными.

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Галченко Л.И., Маточкин В.В. Лучевые осложнения при лучевой терапии. Иркутск, 2015; 30 с. [Galchenko L.I., Matochkin V.V. Radiation-induced complications during radiation therapy. Irkutsk, 2015; 30 p. (in Russian)]. EDN: SLMKNC.
2. Nahum A.E., Uzan J. (Radio)biological optimization of external-beam radiotherapy. *Comput Math Methods Med.* 2012; 2012: 329214. doi: 10.1155/2012/32921.
3. Столбовой А.В., Залялов И.Ф. Радиобиологические модели и клиническая радиационная онкология. *Онкология. Журнал им. П.А. Герцена.* 2016; 6: 88–96. [Stolbovoy A.V., Zalyalov I.F. Radiobiological models and clinical radiation oncology. P.A. Herzen Journal of Oncology. 2016; 6: 88–96. (in Russian)]. doi: 10.17116/onkolog20165688-96. EDN: XHJOUV.
4. Fowler J.F. The linear-quadratic formula and progress in fractionated radiotherapy. *Br J Radiol.* 1989; 62(740): 679–94. doi: 10.1259/0007-1285-62-740-679.
5. Jones B., Dale R.G., Deehan C., Hopkins K.I., Morgan D.A.L. The Role of Biologically Effective Dose (BED) in Clinical Oncology. *Clin Oncol.* 2001; 13(2): 71–81. doi: 10.1053/clon.2001.9221.
6. Tucker S.L., Thames H.D., Taylor J.M. How well is the probability of tumor cure after fractionated irradiation described by Poisson statistics? *Radiat Res.* 1990; 124(3): 273–82.
7. Allen Li X., Alber M., Deasy J.O., Jackson A., Ken Jee K.W., Marks L.B., Martel M.K., Mayo C., Moiseenko V., Nahum A.E., Niemierko A., Semenenko V.A., Yorke E.D. The use and QA of biologically related models for treatment planning: short report of the TG-166 of the therapy physics committee of the AAPM. *Med Phys.* 2012; 39(3): 1386–409. doi: 10.1118/1.3685447.
8. Okunieff P., Morgan D., Niemierko A., Suit H.D. Radiation dose-response of human tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1995; 32(4): 1227–37. doi: 10.1016/0360-3016(94)00475-z.
9. Gay H.A., Niemierko A. A free program for calculating EUD-based NTCP and TCP in external beam radiotherapy. *Phys Med.* 2007; 23(3-4): 115–25. doi: 10.1016/j.ejmp.2007.07.001.
10. Wu Q., Mohan R., Niemierko A., Schmidt-Ullrich R. Optimization of intensity-modulated radiotherapy plans based on the equivalent uniform dose. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2002; 52(1): 224–35.
11. Kutcher G.J., Burman C. Calculation of complication probability factors for non-uniform normal tissue irradiation: The effective volume method gerald. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1989; 16(6): 1623–30. doi: 10.1016/0360-3016(89)90972-3.
12. Lyman J.T. Complication Probability as Assessed from Dose-Volume Histograms. *Radiation Research Supplement.* 1985; 8: 13–9.
13. Mohan R., Mageras G.S., Baldwin B., Brewster L.J., Kutcher G.J., Leibel S., Burman C.M., Ling C.C., Fuks Z. Clinically relevant optimization of 3-D conformal treatments. *Med Phys.* 1992; 19(4): 933–44. doi: 10.1118/1.596781.
14. Källman P., Lind B.K., Brahma A. An algorithm for maximizing the probability of complication-free tumour control in radiation therapy. *Phys Med Biol.* 1992; 37(4): 871–90. doi: 10.1088/0031-9155/37/4/004.
15. Wagner F.M., Specht H., Loeper-Kabasakal B., Breitkreutz H. Современное состояние терапии быстрыми нейтронами. *Сибирский онкологический журнал.* 2015; 6: 5–12. [Wagner F.M., Specht H., Loeper-

Kabasakal B., Breitkreutz H. Fast neutron therapy: a status report. *Siberian Journal of Oncology.* 2015; 6: 5–12. (in Russian)]. EDN: VCHQSF.

16. Грибова О.В., Старцева Ж.А., Великая В.В., Сухих Е.С., Новикова В.А., Чойнзонов Е.Л., Селихова Е.А., Рябова А.И. Опыт применения дистанционной терапии быстрыми нейтронами в городе Томске. *Вопросы онкологии.* 2025; 71(5): 1183–90. [Gribova O.V., Startseva Zh.A., Velikaya V.V., Sukhikh E.S., Novikova V.A., Choyzonov E.L., Selikhova E.A., Ryabova A.I. Experience of using distant therapy with fast neutrons in the city of Tomsk. *Problems in Oncology.* 2025; 71(5): 1183–90. (in Russian)]. doi: 10.37469/0507-3758-2025-71-5-OF-2372. EDN: ZLKDWQ.

17. Великая В.В., Мусабаева Л.И., Старцева Ж.А. Случай лучевых повреждений нормальных тканей после нейтронно-фотонной терапии рака молочной железы. *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2011; 56(2): 67–69. [Velikaya V.V., Musabaeva L.I., Startseva Zh.A. A case of radiation induced damage to normal tissues after neutron-photon therapy for breast cancer. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2011; 56(2): 67–69. (in Russian)]. EDN: TAYCVN.

18. Лисин В.А. Способ оптимизации фракционирования дозы в лучевой терапии злокачественных опухолей в рамках концепции Эллиса. *Медицинская радиология.* 1984; 29(12): 83–87. [Lisin V.A. The method for optimizing dose fractionation in radiation therapy for cancer within the framework of Ellis concept. *Medical Radiology.* 1984; 29(12): 83–87. (in Russian)]. EDN: SPZFUB.

19. Лисин В.А., Великая В.В., Милойчикова И.А. Адаптация линейно-квадратичной модели для планирования режимов облучения в дистанционной нейтронной терапии. *Сибирский онкологический журнал.* 2015; (1): 33–37. [Lisin V.A., Velikaya V.V., Miloichikova I.A. Adaptation of linear-quadratic model for planning neutron therapy regimens. *Siberian Journal of Oncology.* 2015; (1): 33–37. (in Russian)]. EDN: TLJTOR.

20. Orton C., Ellis F. A simplification in the use of the NSD concept in practical radiotherapy. *Br J Radiol.* 1973; 46(547): 529–37.

21. Лисин В.А. Модель ВДФ для дистанционной терапии злокачественных опухолей быстрыми нейтронами. *Медицинская радиология.* 1988; 33(9): 9–12. [Lisin V.A. TDF model for fast neutron radiation therapy of malignant tumors. *Medical Radiology.* 1988; 33(9): 9–12. (in Russian)]. EDN: SJPEYJ.

22. Ярмоненко С.П. Радиобиология человека и животных. М., 1984. 375 с. [Yarmonenko S.P. Human and animal radiobiology. Moscow, 1984. 375 p. (in Russian)].

23. Лисин В.А. Линейно-квадратичная модель в планировании нейтронной терапии на циклотроне У-120. *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2018; 63(5): 41–47. [Lisin V.A. Linear-quadratic model for planning neutron therapy with the use of U-120 cyclotron. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2018; 63(5): 41–47. (in Russian)]. doi: 10.12737/article\_5bc896bae399e0.21861306. EDN: YMMOHV.

24. Лисин В.А., Мусабаева Л.И. Количественная оценка лучевых реакций опухолей с учетом их радиобиологических параметров. *Медицинская радиология.* 1983; 28(12): 30–34. [Lisin V.A., Musabaeva L.I. Quantitative assessment of radiation-induced reactions considering radiobiological parameters. *Medical Radiology.* 1983; 28(12): 30–34. (in Russian)]. EDN: SOESZZ.

25. Иванов В.И., Машикович В.П., Ценгер Э.М. Международная система единиц (СИ) в атомной науке и технике. Справочное руководство. М., 1981. 200 с. [Ivanov V.I., Mashkovich V.P., Center E.M. International System of Units (SI) in Atomic Science and Technology. Reference Guide. M., 1981. 200 p. (in Russian)].
26. Нейтронная терапия злокачественных новообразований. Ред. Л.И. Мусабаева, В.А. Лисин. Томск, 2008. 285 с. [Neutron therapy for malignancies. Ed. L.I. Musabaeva, V.A. Lisin. Tomsk, 2008. 285 p. (in Russian)]. ISBN: 978-5-89503-391-3. EDN: QLSHMP.
27. Burman C., Kutcher G., Emami B., Goitein M. Fitting of normal tissue tolerance data to an analytic function. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1991; 21(1): 123–35.
28. Benadjaoud M.A., Blanchard P., Schwartz B., Champoudry J., Bouaita R., Lefkopoulos D., Deutsch E., Diallo I., Cardot H., de Vathaire F. Functional data analysis in NTCP modeling: a new method to explore the radiation dose-volume effects. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2014; 90(3): 654–63. doi: 10.1016/j.ijrobp.2014.07.008.
29. Martel M.K., Ten Haken R.K., Hazuka M.B., Turrisi A.T., Fraass B.A., Lichten A.S. Dose-volume histogram and 3-D treatment planning evaluation of patients with pneumonitis. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1994; 28(3): 575–81. doi: 10.1016/0360-3016(94)90181-3.
30. Kwa S.L., Lebesque J.V., Theuvs J.C., Marks L.B., Munley M.T., Bentel G., Oetzel D., Spahn U., Graham M.V., Drzymala R.E., Purdy J.A., Lichten A.S., Martel M.K., Ten Haken R.K. Radiation pneumonitis as a function of mean lung dose: an analysis of pooled data of 540 patients. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1998; 42(1): 1–9. doi: 10.1016/s0360-3016(98)00196-5.
31. Seppenwoolde Y., Lebesque J.V., de Jaeger K., Belderbos J.S., Boersma L.J., Schilstra C., Henning G.T., Hayman J.A., Martel M.K., Ten Haken R.K. Comparing different NTCP models that predict the incidence of radiation pneumonitis. Normal tissue complication probability. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2003; 55(3): 724–35. doi: 10.1016/s0360-3016(02)03986-x.
32. Martel M.K., Sahijdak W.M., Ten Haken R.K., Kessler M.L., Turrisi A.T. Fraction Size and Dose Parameters Related to the Incidence of Pericardial Effusions. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1998; 40(1): 155–61. doi: 10.1016/s0360-3016(97)00584-1.
33. Moiseenko V., Wu J., Hovan A., Saleh Z., Apte A., Deasy J.O., Harrow S., Rabuka C., Muggli A., Thompson A. Treatment planning constraints to avoid xerostomia in head-and-neck radiotherapy: an independent test of QUANTEC criteria using a prospectively collected dataset. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2012; 82(3): 1108–14. doi: 10.1016/j.ijrobp.2011.04.020.
34. Rancati T., Wennberg B., Lind P., Svane G., Gagliardi G. Early clinical and radiological pulmonary complications following breast cancer radiation therapy: NTCP fit with four different models. *Radiother Oncol.* 2007; 82(3): 308–16. doi: 10.1016/j.radonc.2006.12.001.
35. Moiseenko V., Craig T., Bezjak A., Van Dyk J. Dose-volume analysis of lung complications in the radiation treatment of malignant thymoma: a retrospective review. *Radiother Oncol.* 2003; 67(3): 265–74. doi: 10.1016/s0167-8140(03)00003-3.
36. Eisbruch A., Ten Haken R.K., Kim H.M., Marsh L.H., Ship J.A. Dose, volume, and function relationships in parotid salivary glands following conformal and intensity-modulated irradiation of head and neck cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1999; 45(3): 577–87. doi: 10.1016/s0360-3016(99)00247-3.
37. Schilstra C., Meertens H. Calculation of the uncertainty in complication probability for various dose-response models, applied to the parotid gland. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2001; 50(1): 147–58. doi: 10.1016/s0360-3016(00)01553-4.
38. Roesink J.M., Moerland M.A., Battermann J.J., Hordijk G.J., Terhaard C.H.J. Quantitative dose-volume response analysis of changes in parotid gland function after radiotherapy in the head-and-neck region. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2001; 51(4): 938–46. doi: 10.1016/s0360-3016(01)01717-5.
39. Braam P.M., Roesink J.M., Moerland M.A., Raaijmakers C.P.J., Schipper M., Terhaard C.H.J. Long-term parotid gland function after radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2005; 62(3): 659–64. doi: 10.1016/j.ijrobp.2004.12.015.
40. Semenenko V.A., Li X.A. Lyman-Kutcher-Burman NTCP model parameters for radiation pneumonitis and xerostomia based on combined analysis of published clinical data. *Phys Med Biol.* 2008; 53(3): 737–55. doi: 10.1088/0031-9155/53/3/014.
41. Dawson L.A., Normolle D., Balter J.M., McGinn C.J., Lawrence T.S., Ten Haken R.K. Analysis of radiation-induced liver disease using the Lyman NTCP model. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2002; 53(4): 810–21. doi: 10.1016/s0360-3016(02)02846-8.
42. Gay H.A., Niemierko A. A free program for calculating EUD-based NTCP and TCP in external beam radiotherapy. *Phys Med.* 2007; 23(3-4): 115–25. doi: 10.1016/j.ejmp.2007.07.001.
43. Cheng J.C., Wu J.K., Huang C.M., Liu H.S., Huang D.Y., Cheng S.H., Tsai S.Y., Jian J.J., Lin Y.M., Cheng T.I., Horig C.F., Huang A.T. Radiation-induced liver disease after three-dimensional conformal radiotherapy for patients with hepatocellular carcinoma: dosimetric analysis and implication. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2002; 54(1): 156–62. doi: 10.1016/s0360-3016(02)02915-2.
44. Belderbos J., Heemsbergen W., Hoogeman M., Pencil K., Rossi M., Lebesque J. Acute esophageal toxicity in non-small cell lung cancer patients after high dose conformal radiotherapy. *Radiother Oncol.* 2005; 75(2): 157–64. doi: 10.1016/j.radonc.2005.03.021.
45. De Jaeger K., Hoogeman M.S., Engelsman M., Seppenwoolde Y., Damen E.M., Mijnheer B.J., Boersma L.J., Lebesque J.V. Incorporating an improved dose-calculation algorithm in conformal radiotherapy of lung cancer: re-evaluation of dose in normal lung tissue. *Radiother Oncol.* 2003; 69(1): 1–10. doi: 10.1016/s0167-8140(03)00195-6.
46. Willner J., Baier K., Caragiani E., Tschammler A., Flentje M. Dose, volume, and tumor control prediction in primary radiotherapy of non-small-cell lung cancer. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2002; 52(2): 382–89. doi: 10.1016/s0360-3016(01)01823-5.
47. Cheung R., Tucker S.L., Dong L., Kuban D. Dose-response for biochemical control among high-risk prostate cancer patients after external beam radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2003; 56(5): 1234–40. doi: 10.1016/s0360-3016(03)00278-5.
48. Levegrün S., Jackson A., Zelefsky M.J., Venkatraman E.S., Skwarczuk M.W., Schlegel W., Fuks Z., Leibel S.A., Ling C.C. Risk group dependence of dose-response for biopsy outcome after three-dimensional conformal radiation therapy of prostate cancer. *Radiother Oncol.* 2002; 63(1): 11–26. doi: 10.1016/s0167-8140(02)00062-2.
49. Okunieff P., Morgan D., Niemierko A., Suit H.D. Radiation dose-response of human tumors. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1995; 32(4): 1227–37. doi: 10.1016/0360-3016(94)00475-z.
50. Cotter G.W., Baglan R.T., Wasserman T.H., Mill W. Palliative radiation treatment of cutaneous mycosis fungoides – a dose response. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1983; 9(10): 1477–80. doi: 10.1016/0360-3016(83)90321-8.
51. Peckham M.J., Ford H.T., McElwain T.J., Harmer C.L., Atkinson K., Austin D.E. The results of radiotherapy for Hodgkin's disease. *Br J Cancer.* 1975; 32(3): 391–400. doi: 10.1038/bjc.1975.239.
52. Russell A.H., Pajak T.E., Selim H.M., Paradelo J.C., Murray K., Bansal P., Cooper J.D., Silverman S., Clement J.A. Prophylactic cranial irradiation for lung cancer patients at high risk for development of cerebral metastasis: results of a prospective randomized trial conducted by the Radiation Therapy Oncology Group. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1991; 21(3): 637–43. doi: 10.1016/0360-3016(91)90681-s.
53. Overgaard J., Overgaard M., Vejby Hansen P., von der Maase H. Some factors of importance in the radiation treatment of malignant melanoma. *Radiother Oncol.* 1986; 5(3): 183–92. doi: 10.1016/s0167-8140(86)80048-2.
54. Bedwinek J.M., Perez C.A., Keys D.J. Analysis of failures after definitive irradiation for epidermoid carcinoma of the nasopharynx. *Cancer.* 1980; 45(11): 2725–29. doi: 10.1002/1097-0142(19800601)45:11<2725::aid-cnrc2820451105>3.0.co;2-1.
55. Bataini P., Brugere J., Bernier J., Jaulerry C.H., Picot C., Ghossein N.A. Results of radical radiotherapeutic treatment of carcinoma of the pyriform sinus: Experience of the Institut Curie. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1982; 8(8): 1277–86. doi: 10.1016/0360-3016(82)90576-4.
56. Perez C.A., Kao M.S. Radiation therapy alone or combined with surgery in the treatment of barrel-shaped carcinoma of the uterine cervix (stages IB, IIA, IIB). *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 1985; 11(11): 1903–909. doi: 10.1016/0360-3016(85)90270-6.
57. Perez C.A., Breaux S., Bedwinek J.M., Madoc-Jones H., Camel H.M., Purdy J.A., Walz B.J. Radiation therapy alone in the treatment of carcinoma of the uterine cervix. II. Analysis of complications. *Cancer.* 1984; 54(2): 235–46. doi: 10.1002/1097-0142(19840715)54:2<235::aid-cnrc2820540210>3.0.co;2-h.
58. Perez C.A., Stanley K., Rubin P., Kramer S., Brady L., Perez-Tamayo R., Brown G.S., Concannon J., Rotman M., Seydel H.G. A prospective randomized study of various irradiation doses and fractionation schedules in the treatment of inoperable non-ot-cell carcinoma of the lung. Preliminary report by the Radiation Therapy Oncology Group. *Cancer.* 1980; 45(11): 2744–53. doi: 10.1002/1097-0142(19800601)45:11<2744::aid-cnrc2820451108>3.0.co;2-u.
59. Choi N.C.H., Doucette J.A. Improved survival of patients with unresectable non-small-cell bronchogenic carcinoma by an innovated high-dose En-Bloc radiotherapeutic approach. *Cancer.* 1981; 48(1): 101–109. doi: 10.1002/1097-0142(19810701)48:1<101::aid-cnrc2820480120>3.0.co;2-s.
60. Сухих Е.С., Селихова Е.А., Сутыгина Я.Н., Конев А.В. Веб-приложение для работы с базой данных радиобиологических параметров опухолей и нормальных тканей для фотонной и нейтронной лучевой терапии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682233. Заявл. 24.10.2023; Опубл. 24.10.2023. [Sukhikh E.S., Selikhova E.A., Sutygina Ya.N., Konev A.V. Web application

for working with a database of radiobiological parameters of tumors and normal tissues for photon and neutron radiation therapy. Certificate of state registration of the computer program No. 2023682233. Declared. 24.10.2023; Publ. 24.10.2023. (in Russian)]. EDN: TLARBD.

61. *Новоселов К.И., Сухих Е.С., Сутыгина Я.Н., Бразовский К.С.* Калькулятор TCP/NTCP. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023664910. Заявл. 10.07.2023; Опубли.

10.07.2023. [Novoselov K.I., Sukhikh E.S., Sutygina Y.N., Brazovsky K.S. TCP/NTCP calculator. Certificate of state registration of the computer program No. 2023664910. Declared. 10.07.2023; Publ. 10.07.2023. (in Russian)]. EDN: BTMHQF.

Поступила/Received 30.09.2024

Одобрена после рецензирования/Revised 03.03.2026

Принята к публикации/Accepted 13.03.2026

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Селихова Екатерина Александровна**, аспирант, инженер научно-образовательного центра «Технологический референсный центр ионизирующего излучения в радиологии, лучевой терапии и ядерной медицине», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия). SPIN-код: 2867-0404. Author ID (Scopus): 57194633777. ORCID: 0000-0002-0257-6017.

**Сагов Ислам Русланович**, аспирант, инженер научно-образовательного центра «Технологический референсный центр ионизирующего излучения в радиологии, лучевой терапии и ядерной медицине», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия); эксперт-физик по контролю ИИИНИИ, ГАУЗ ТО «МКМЦ «Медицинский город» (г. Тюмень, Россия). ORCID: 0009-0002-1117-0649.

**Сухих Евгения Сергеевна**, доктор физико-математических наук, директор научно-образовательного центра «Технологический референсный центр ионизирующего излучения в радиологии, лучевой терапии и ядерной медицине», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»; научный сотрудник отделения радиотерапии, Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук (г. Томск, Россия). SPIN-код: 3699-3110. Author ID (Scopus): 57200560611. ORCID: 0000-0001-8251-2138.

**Стахова Ольга Михайловна**, инженер научно-образовательного центра «Технологический референсный центр ионизирующего излучения в радиологии, лучевой терапии и ядерной медицине», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия); медицинский физик, ГАУЗ ТО «МКМЦ «Медицинский город» (г. Тюмень, Россия). Author ID (Scopus): 57407021300. ORCID: 0000-0002-7456-2351.

**Грибова Ольга Вячеславовна**, доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник отделения радиотерапии, Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук (г. Томск, Россия). SPIN-код: 1405-1669. Researcher ID (WOS): D-7796-2012. Author ID (Scopus): 55917908000. ORCID: 0000-0003-1696-427X.

**Великая Виктория Валерьевна**, доктор медицинских наук, старший научный сотрудник отделения радиотерапии, Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук (г. Томск, Россия). SPIN-код: 6959-6382. Researcher ID (WOS): J-2354-2017. Author ID (Scopus): 55543255600. ORCID: 0000-0002-0798-2612.

**Старцева Жанна Александровна**, доктор медицинских наук, профессор РАН, заведующая отделением радиотерапии, Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук (г. Томск, Россия). SPIN-код: 8121-0310. Author ID (Scopus): 6506368484. ORCID: 0000-0002-4345-7719.

**Бразовский Константин Станиславович**, доктор технических наук, профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий (Ректорат), ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия). SPIN-код: 2868-1921. Researcher ID (WOS): U-8758-2019. Author ID (Scopus): 56582319400. ORCID: 0000-0002-4779-9820.

**Конев Артур Валерьевич**, программист научно-образовательного центра «Технологический референсный центр ионизирующего излучения в радиологии, лучевой терапии и ядерной медицине», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия).

**Сутыгина Яна Николаевна**, инженер научно-образовательного центра «Технологический референсный центр ионизирующего излучения в радиологии, лучевой терапии и ядерной медицине», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (г. Томск, Россия). SPIN-код: 4151-0861. ORCID: 0000-0001-9212-3339.

## ВКЛАД АВТОРОВ

**Селихова Екатерина Александровна:** разработка концепции и дизайна научной работы, сбор и обработка данных, обработка результатов исследования, подготовка иллюстративного материала, написание статьи.

**Сагов Ислам Русланович:** разработка концепции и дизайна научной работы, сбор материала исследования, обработка результатов исследования, подготовка иллюстративного материала, написание статьи.

**Сухих Евгения Сергеевна:** общее руководство проектом, разработка концепции научной работы, подготовка иллюстративного материала, редактирование статьи с внесением ценного интеллектуального содержания.

**Стахова Ольга Михайловна:** сбор материала исследования, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

**Грибова Ольга Вячеславовна:** сбор и обработка данных, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

**Великая Виктория Валерьевна:** сбор и обработка данных, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

**Старцева Жанна Александровна:** сбор и обработка данных, критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

**Бразовский Константин Станиславович:** сбор и обработка данных, редактирование статьи с внесением ценного интеллектуального содержания.

**Конеv Артур Валерьевич:** обработка результатов исследования.

**Сутыгина Яна Николаевна:** сбор и обработка данных.

Все авторы одобрили финальную версию статьи перед публикацией, выразили согласие нести ответственность за все аспекты работы, подразумевающую надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой части работы.

### **Финансирование**

*Это исследование разработано при поддержке программы «Приоритет-2030».*

### **Конфликт интересов**

*Автор Старцева Ж.А. (доктор медицинских наук, профессор РАН) является членом редколлегии «Сибирского онкологического журнала». Авторам неизвестно о каком-либо другом потенциальном конфликте интересов, связанном с этой статьей.*

## ABOUT THE AUTHORS

**Ekaterina A. Selikhova**, Postgraduate, Engineer, Scientific and Educational Center “Technological Reference Center of Ionizing Radiation in Radiology, Radiation Therapy and Nuclear Medicine”, National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). Author ID (Scopus): 57194633777. ORCID: 0000-0002-0257-6017.

**Islam R. Sagov**, Postgraduate, Engineer, Scientific and Educational Center “Technological Reference Center of Ionizing Radiation in Radiology, Radiation Therapy and Nuclear Medicine”, National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia); Expert-Physicist for the control of IR&NIR, Multidisciplinary clinical medical center “Medical city” (Tyumen, Russia). ORCID: 0009-0002-1117-0649.

**Evgeniya S. Sukhikh**, DSc, Director, Scientific and Educational Center “Technological Reference Center of Ionizing Radiation in Radiology, Radiation Therapy and Nuclear Medicine”, National Research Tomsk Polytechnic University; Researcher, Radiotherapy Department, Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia). Author ID (Scopus): 57200560611. ORCID: 0000-0001-8251-2138.

**Olga M. Stakhova**, Engineer, Scientific and Educational Center “Technological Reference Center of Ionizing Radiation in Radiology, Radiation Therapy and Nuclear Medicine”, National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia); Medical Physicist, Multidisciplinary clinical medical center “Medical city” (Tyumen, Russia). Author ID (Scopus): 57407021300. ORCID: 0000-0002-7456-2351.

**Olga V. Gribova**, MD, DSc, Leading Researcher, Radiotherapy Department, Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia). Researcher ID (WOS): D-7796-2012. Author ID (Scopus): 55917908000. ORCID: 0000-0003-1696-427X.

**Viktoriya V. Velikaya**, MD, DSc, Senior Researcher, Radiotherapy Department, Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia). Researcher ID (WOS): J-2354-2017. Author ID (Scopus): 55543255600. ORCID: 0000-0002-0798-2612.

**Zhanna A. Startseva**, MD, DSc, Professor, Head of the Radiotherapy Department, Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia). Author ID (Scopus): 6506368484. ORCID: 0000-0002-4345-7719.

**Konstantin S. Brazovsky**, DSc, Professor, Research School of Chemical and Biomedical Technologies (Rectorate), National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). Researcher ID (WOS): U-8758-2019. Author ID (Scopus): 56582319400. ORCID: 0000-0002-4779-9820.

**Artur V. Konev**, Programmer, Scientific and Educational Center “Technological Reference Center of Ionizing Radiation in Radiology, Radiation Therapy and Nuclear Medicine”, National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia).

**Yana N. Sutygina**, Engineer, Scientific and Educational Center “Technological Reference Center of Ionizing Radiation in Radiology, Radiation Therapy and Nuclear Medicine”, National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia). ORCID: 0000-0001-9212-3339.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

**Ekaterina A. Selikhova:** study concept and design, data collection and processing, analysis of research results, preparation of illustrative material, manuscript writing.

**Islam R. Sagov:** study concept and design, data collection, processing of research results, preparation of illustrative material, manuscript writing.

**Evgeniya S. Sukhikh:** general management of the project, development of the concept of the scientific work, preparation of illustrative material, editing of the manuscript, critical revision with the introduction of valuable intellectual content.

**Olga M. Stakhova:** collection of research material, critical revision with the introduction of valuable intellectual content.

**Olga V. Gribova:** data collection and processing, critical revision with the introduction of valuable intellectual content.

**Viktoriya V. Velikaya:** data collection and processing, critical revision with the introduction of valuable intellectual content.

**Zhanna A. Startseva:** data collection and processing, critical revision with the introduction of valuable intellectual content.

**Konstantin S. Brazovsky:** data collection and processing, editing the article with the introduction of valuable intellectual content.

**Artur V. Konev:** processing of research results.

**Yana N. Sutygina:** data collection and processing.

All authors approved the final version of the manuscript prior to publication and agreed to be accountable for all aspects of the work in ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work were appropriately investigated and resolved.

***Funding***

*This study was supported by the Priority 2030 programme.*

***Conflict of interests***

*Prof. Startseva Zh.A. is a member of the editorial board of Siberian Journal of Oncology. The authors are not aware of any other potential conflicts of interest related to this manuscript.*