

Компьютерная программа расчета внутриутробных доз от техногенных радионуклидов

Е.А. Шишкина^{1,2}, П.А. Шарагин¹, Е.И. Толстых¹

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины, Федеральное медико-биологическое агентство, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Челябинск, Россия

Введение: В рамках дозиметрического сопровождения эпидемиологических исследований, проводимых для населения Уральского региона, была создана компьютерная программа для расчета доз внутриутробного облучения - «FetusDose». *Краткое содержание:* В статье описан принцип организации и функциональные возможности компьютерной программы. Программа предназначена для расчета триместровых и суммарных накопленных доз на красный костный мозг и внескелетные ткани плода при его облучении техногенными радионуклидами, аварийно попавшими в окружающую среду. Рассматриваются два сценария облучения: внешнее от загрязненной почвы гамма-излучающими радионуклидами (^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}/^{144\text{m}}\text{Pr}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, ^{91}Y и $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$) и внутреннее от перорального поступления $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{89}Sr , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ и $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}/^{144\text{m}}\text{Pr}$ в организм матери с пищей и водой. *Заключение:* Программа может применяться как для изучения последствий уже случившихся радиационных инцидентов, так и для прогнозирования величины радиационного воздействия от потенциальных угроз. Программа также может быть полезна в учебных целях при подготовке специалистов в области радиобиологии и дозиметрии.

Ключевые слова: внутриутробное облучение, внутреннее облучение, внешнее облучение, плод, беременность, радионуклиды.

Введение

Человеческий организм в период внутриутробного развития чрезвычайно радиочувствителен. Тяжесть последствий облучения для здоровья зависит от стадии внутриутробного развития и от дозовой нагрузки [1–3]. Одним из примеров исследований в этой области является прослеживание когорты лиц, внутриутробно облучавшихся в результате радиоактивного загрязнения территорий Южного Урала, и оценка радиационных рисков [4, 5]. Важной составляющей этих работ является корректная оценка доз внутриутробного облучения. В рамках продолжающихся дозиметрических исследований на Южном Урале совершенствуются алгоритмы и программы расчета доз для населения.

Цель исследования – описание компьютерной программы «FetusDose» для расчета триместровых и суммарных накопленных доз на красный костный мозг (ККМ) и внескелетные ткани плода от техногенных радионуклидов, аварийно попавших в окружающую среду и в организм матери.

Методы расчета доз в программе «FetusDose»

Дозы облучения ККМ и внескелетных тканей рассчитываются для всего срока беременности и отдельно для триместров: 1) 1–12 недели; 2) 13–25 недель; 3) 26–38 недель. Дозы на ККМ в первый триместр равны нулю, поскольку минерализованная кость и ККМ не сформированы. Дозы внешнего облучения рассчитываются для сценариев загрязнения

почвы гамма-излучающими радионуклидами (^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}/^{144\text{m}}\text{Pr}$, $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$, ^{91}Y и $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$) по данным о динамике мощности доз (Гр/с) в воздухе на высоте 1 м над уровнем почвы. Мощности доз задаются непосредственно, либо рассчитываются по вертикальному распределению удельной активности радионуклидов в почве [6]. Переход от мощности дозы в воздухе к дозам на плод в разные триместры осуществляется согласно [7–8].

Дозы внутреннего облучения плода зависят от времени между поступлением и родами. Они рассчитываются для $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{89}Sr , $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ и $^{144}\text{Ce}/^{144}\text{Pr}/^{144\text{m}}\text{Pr}$, поступивших в организм матери во время беременности или за некоторое время до наступления беременности (для ^{90}Sr – за 10 и менее лет; для остальных – менее 3 лет до родов). Расчет проводится на основе динамики поступления радионуклидов и комбинации биокинетических и дозиметрических моделей. Используются биокинетические модели ^{137}Cs и ^{144}Ce для матери до наступления беременности [9–10] и матери и плода [11]. Для изотопов Sr применяются оригинальные модели [12–13]. Переход к поглощенным дозам осуществляется с помощью соответствующих коэффициентов: для ^{144}Ce согласно [11]; для ^{137}Cs и $^{89,90}\text{Sr}$ согласно [14].

Программа реализована на платформе Python 3.11.1 и представляет собой исполняемый файл и дополнительные таблицы общим размером 270 Мб. Входные и выходные данные - в формате csv с разделителем “;”. Программа предназначена для использования на IBM PC совместимых компьютерах с операционными системами Windows 8 и старше.

Шишкина Елена Анатольевна

Уральский научно-практический центр радиационной медицины

Адрес для переписки: 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: lena@urcrrm.ru

Описание программы «FetusDose»

На рисунке 1 показан интерфейс. Квадратные индикаторы предполагают возможность выбора нескольких вариантов. Так, можно рассматривать совместно внешнее и внутреннее облучение; можно выбрать один или несколько радионуклидов. Круглые индикаторы предполагают единственный выбор.

На левой панели устанавливаются параметры расчета доз внешнего облучения. Значения по умолчанию приняты на основе дозиметрических исследований, проводившихся в Уральском регионе. С помощью кнопки вверху панели загружается файл с историями облучения в виде таблицы (табл. 1).

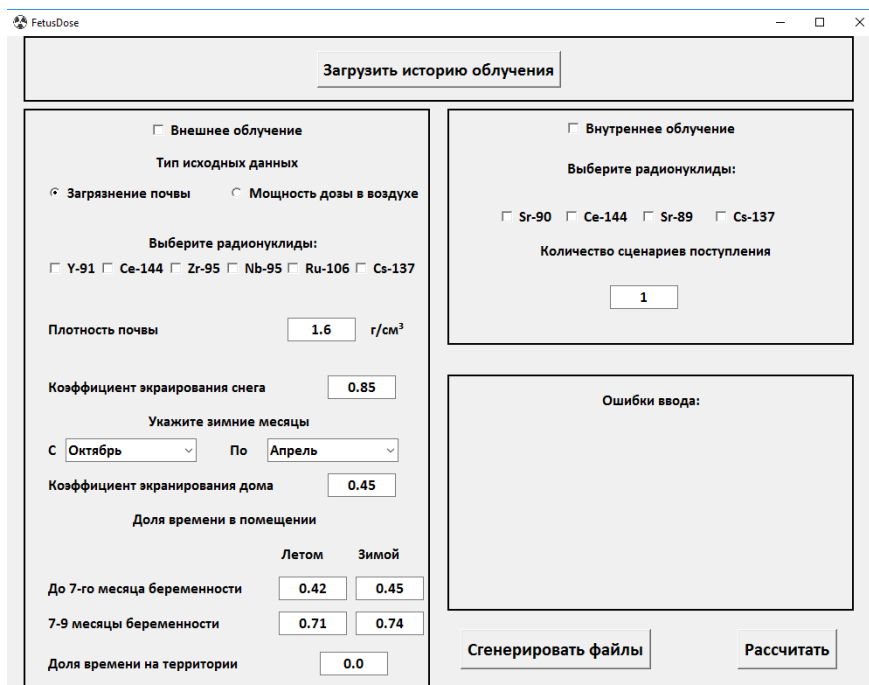


Рис. 1. Интерфейс программы «FetusDose»
[Fig. 1. The interface of the FetusDose program]

Таблица 1

Базовая таблица входных данных; / – место контакта, t_1 – дата начала контакта; t_2 – дата конца контакта; R – режим поступления

[Table 1

The basic input data table; / is the place of the contact, t_1 is the date of the beginning of the contact; t_2 is the date of the end of the contact; R is the intake mode]

Код матери [Mother's code]	Дата рождения матери [Mother's birth date]	Код ребенка [Child's code]	Дата рождения ребенка [Child's birth date]	/	t_1	t_2	R	Поправка на возраст для ^{90}Sr [Age correction for ^{90}Sr]	Коэффициент индивидуализации для Sr [individualization factor for Sr]	Коэффициент индивидуализации для Cs [individualization factor for Cs]
191	03.05.1935	1537	02.06.1958	1	05.11.1957	02.04.1958	1	1	1	1
191	03.05.1935	1537	02.06.1958	2	05.11.1957	02.04.1958	2	1	1	1

Он должен содержать список реальных лиц или условных людей. Код матери и код ребенка – уникальные номера, присваиваемые реальным лицам для анонимизации данных либо произвольная кодировка для условных людей и гипотетических сценариев. Место контакта с радиоактивно-загрязненной территорией также кодируется. Если мать проживала на территориях с разными уровнями радиоактивного загрязнения (как показано в табл. 1), то для нее (и плода) будет несколько записей с соответствующей динамикой мощности дозы и сценарием поступления.

Динамика мощности дозы в воздухе или вертикальное распределение радионуклидов для каждого места контакта подготавливается на следующем этапе. Описание сценариев поступления также дается в виде дополнительных таблиц на следующем этапе. Если внутреннее облучение отсутствовало, то в графе режим поступления указывается «0».

Есть возможность включить индивидуализирующие поправки к поступлению радионуклидов для расчета доз внутреннего облучения.

Например, если имеется информация о среднем поступлении ^{90}Sr , характерном для взрослых лиц, а начало поступления в конкретном случае пришлось на возраст 5 лет (за 10 лет до беременности), то указанный режим поступления стронция следует скорректировать на возраст в графе «Поправка на возраст для ^{90}Sr ». Можно также индивидуализировать поступление радионуклида (по измерениям ^{90}Sr или ^{137}Cs в продуктах питания или в организме) указав поправочный коэффициент в двух последних колонках базового файла (табл. 1).

После того, как сценарии указаны и базовый файл загружен, кнопкой «Сгенерировать файлы» генерируются шаблоны дополнительных файлов. Для расчета доз внешнего облучения на основе мощностей доз в воздухе про-

грамма сгенерирует шаблон – «kerma.csv», где количество строк должно соответствовать количеству мест контакта, указанных в базовой таблице (табл. 2). Столбцы соответствуют периодам в приближении постоянной мощности дозы для каждого периода.

Если предполагается присутствие короткоживущих гамма-излучателей, то рекомендуется разбиение на периоды не более 10 дней. Динамика заглупления радионуклидов - в файлах с именами типа «n_r_m.csv», где n – номер места контакта; r – название элемента; m – массовое число радионуклида. Например, динамика удельной активности ^{137}Cs на территории под номером 1 должна быть записана в файл «1_Cs_137.csv» (табл. 3).

Таблица 2

Пример заполнения дополнительной таблицы «kerma.csv». Мощность дозы в воздухе вводится в единицах Гр/с

[Table 2]

An example of filling in an additional the kerma.csv table. The dose rate in the air is in the units of Gy/s

Место контакта [Contact place]	01.07.1950	01.08.1950	01.09.1950	01.10.1950	01.11.1950
1	2.5E-10	4.3E-11	1.3E-11	6.3E-12	3.2E-12
2	9.1E-11	5.2E-11	7.4E-12	4.0E-12	2.9E-12

Таблица 3

Пример таблицы с динамикой вертикального распределения ^{137}Cs в почве («n_Cs_137.csv»). Удельная активность приводится в единицах Бк/м³

[Table 3]

An example of a table with the dynamics of the vertical distribution of ^{137}Cs in soil («n_Cs_137.csv»). The specific activity is in units of Bq/m³

Глубина, см [Depth, cm]	10.10.1957	10.11.1957	10.12.1957	10.01.1958	10.02.1958
1	4.80E+05	4.00E+05	1.90E+04	1.00E+04	4.10E+03
5	1.90E+04	1.00E+04	4.10E+03	4.00E+03	1.60E+03

Глубина слоя задается по нижней границе в предположении равномерного распределения внутри слоя. Максимальная глубина – 30 см. Способы разбиения по глубине и количеству слоев не регламентируются. Для короткоживущих ($T_{1/2} < 1$ года) радионуклидов рекомендуется выбирать шаг разбиения не более $(1/3 \cdot T_{1/2})$. Для внутреннего облучения генерируется шаблон поступления для заданного количества сценариев с именами вида «Ri.csv», где рядом с литерой «R» указан номер сценария *i* (например, «R1.csv») (табл. 4).

Таблица 4

Пример входных данных, описывающих режим поступления радионуклидов, Бк/день

[Table 4]

An example of input data describing the mode of intake of radionuclides (Bq/day)

Дата [Date]	^{90}Sr	^{89}Sr	^{137}Cs	^{144}Ce
30.09.1957	103.5	0	6.7	1261.4
01.10.1957	103.5	0	6.7	1261.4

Вычисления запускаются кнопкой «Рассчитать». Программа проверяет корректность заполнения таблиц. Если обнаруживаются ошибки, то в правой нижней панели интерфейса выводится их описание. Триместровые и суммарные дозы выводятся в файл «dose.csv».

Заключение

Дальнейшее усовершенствование программы будет направлено на: создание возможностей для прогнозирования доз при потенциальных радиационных инцидентах и на совершенствование расчетных методов. Предполагается включение других радионуклидов и сценариев облучения. Так, предполагается добавить сценарий внешнего облучения от радиоактивного облака и внутреннего облучения от изотопов $^{87,88}\text{Kr}$, $^{131,132,133}\text{I}$, ^{134}Cs , ^{91}Sr , $^{103,106}\text{Ru}$, $^{131m,132}\text{Te}$, поступающих в организм матери перорально и ингаляционно. Планируется уточнение дозовых коэффициенты для изотопов стронция на основе новых вычислительных фантомов скелета плода, полученных методом SPSSD [15] с учетом микроархитектуры костей, что может существенно повлиять на оценку доз на ККМ [16]. Программа может быть полезна также в учебных целях при подготовке специалистов в области радиобиологии и дозиметрии.

Сведения о личном вкладе авторов в работу над статьей

Шишкина Е.А. – разработка концепции, написание статьи, дизайн исследования;

Шарагин П.А. – вычисления, написание программы, редактирование статьи;

Толстых Е.И. – вычисления, редактирование статьи.

Благодарности

Авторы благодарят Кравцову О.С. за техническую помощь при подготовке библиотек. Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за проделанную работу.

Информация о конфликте интересов

Авторы декларируют отсутствие конфликтов интересов.

Сведения об источнике финансирования

Финансирование работы осуществлялось в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» НИОКР.

Литература

- Shaw P., Duncan A., Vouyouka A., Ozsvath K. Radiation Exposure and Pregnancy // *Journal of Vascular Surgery*. 2011. Vol. 53, № 1. P. 28–34. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.05.140.
- Preston D., Cullings H., Suyama A., et al. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Exposed In Utero or as Young Children // *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*. 2008. Vol. 100, № 6. P. 428–436. DOI: 10.1093/jnci/djn045.
- McCollough C.H., Schueler B.A., Atwell T.D., et al. Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? // *Radiographics*. 2007. Vol. 27, № 4. P. 909–917; discussion P. 917–918.
- Akleyev A., Deltour I., Krestinina L., et al. Incidence and Mortality of Solid Cancers in People Exposed in Utero to Ionizing Radiation: Pooled Analyses of Two Cohorts from the Southern Urals, Russia // *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, № 8. P. e0160372. DOI: 10.1371/journal.pone.0160372.
- Krestinina L.Yu., Kharyuzov Y.E., Epifanova S.B., et al. Cancer Incidence after in Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents // *Radiation Research*. 2017. Vol. 188, № 3. P. 314–324. DOI: 10.1667/RR14695.1.
- Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б. Оценка мощностей доз в воздухе при неравномерном вертикальном распределении γ -излучающих радионуклидов в различных типах почв // *Вопросы радиационной безопасности*. 2016. № 3. С. 42–51.
- Шишкина Е.А., Волчкова А.Ю., Дегтева М.О., Напье Б. Дозовые коэффициенты для конвертации воздушной кермы в значения мощности дозы в органах людей разного возраста при внешнем облучении от ^{137}Cs в почве // *Вопросы радиационной безопасности*. 2018. № 3. С. 36–47.
- Petoussi-Hens N., Satoh D., Schlattl H., et al. Organ doses of the fetus from external environmental exposures // *Radiation Environmental Biophysics*. 2021. Vol. 60, № 1. P. 93–113. DOI: 10.1007/s00411-020-00891-6.
- Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 1. ICRP Publication 56 // *Annals of the ICRP*. 1990. 20 (2).
- The Metabolism of Plutonium and Related Elements. ICRP Publication 48 // *Annals of the ICRP*. 1986. 16 (2–3).
- Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88. *Annals of the ICRP*. 2001. 31 (1–3).
- Shagina N.B., Tolstykh E.I., Degteva M.O., et al. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, № 1. P. 87–127.
- Shagina N.B., Fell T.P., Tolstykh E.I., et al. Strontium biokinetic model for the pregnant woman and fetus: application to Techa River studies // *Journal of Radiological Protection*. 2015. Vol. 35, № 3. P. 659–676. DOI: 10.1088/0952-4746/35/3/659.
- Maynard M.R., Shagina N.B., Tolstykh E.I., et al. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose // *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015. Vol. 54, № 1. P. 47–59. DOI: 10.1007/s00411-014-0570-5.
- Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A., et al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description // *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16, № 10 P. e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605.
- Шарагин П.А., Шишкина Е.А., Толстых Е.И., Дегтева М.О. Влияние детализации трабекулярной структуры фантомов кости на оценку дозы облучения костного мозга от $^{89\text{Sr}}$ // *Радиационная гигиена*. 2022. Т. 15, № 4. С. 7–14.

Поступила: 03.12.2024

Шишкина Елена Анатольевна – доктор биологических наук, исполняющий обязанности заведующей биофизической лабораторией Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства; доцент кафедры «Радиобиология» Челябинского государственного университета. **Адрес для переписки:** 454014, Россия, г. Челябинск, ул. Воровского, 68-А; E-mail: lena@urcrm.ru

ORCID: 0000-0003-4464-0889

Шарагин Павел Алексеевич – младший научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0002-1457-4916

Толстых Евгения Игоревна – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины Федерального медико-биологического агентства, Челябинск, Россия

ORCID: 0000-0002-4958-3214

Для цитирования: Шишкина Е.А., Шарагин П.А., Толстых Е.И. Компьютерная программа расчета внутриутробных доз от техногенных радионуклидов // *Радиационная гигиена*. 2025. Т. 18, № 1. С. 121–126. DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-1-121-126

Computer program for calculation of in-utero doses from anthropogenic radionuclides

Elena A. Shishkina^{1,2}, Pavel A. Sharagin¹, Evgenia I. Tolstykh¹¹ Urals Research Center for Radiation Medicine, Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia² Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

Introduction: A computer program was created to calculate intrauterine radiation doses, "FetusDose", in the frame of the dosimetric support of epidemiological studies conducted for the population of the Ural region. Summary: The paper presents the method and describes the principle of organization and functionality of the computer program. The software is designed to calculate trimester and total doses accumulated in the active marrow and extra-skeletal tissues of the fetus when it is irradiated with anthropogenic radionuclides that have accidentally contaminated the environment. When calculating doses, two radiation scenarios are considered: the external one from soil contaminated with gamma-emitters (⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb, ¹⁴⁴Ce/^{144m}Pr/^{144m}Pr, ¹⁰⁶Ru/¹⁰⁶Rh, ⁹¹Y and ¹³⁷Cs/^{137m}Ba) and the internal one from oral intake of radionuclides (⁹⁰Sr/⁹⁰Y, ⁸⁹Sr, ¹³⁷Cs/^{137m}Ba and ¹⁴⁴Ce/¹⁴⁴Pr/^{144m}Pr) into the mother's body with food and water. Conclusion: The software can be used both to study the consequences of radiation incidents that have already occurred, and to predict the radiation exposure from potential threats. The program will also be useful for educational purposes in the training of specialists in the field of radiobiology and dosimetry.

Key words: intrauterine radiation, internal radiation, external radiation, fetus, pregnancy, radionuclides.

Authors' personal contribution

Shishkina E.A. – conceptualization, article writing, research design.

Sharagin P.A.– calculations, program writing, editing the article.

Tolstykh E.I. – calculations, editing of the article.

Acknowledgments

The authors thank O.S. Kravtsova for technical assistance in the preparation of software libraries. The authors express the gratitude to the anonymous reviewers for the work done.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

Sources of funding

The study was supported by Federal Medical-Biological Agency in the framework of Russian Federal Targeted Program "Provision of nuclear and radiation safety for the period 2016–2020 and for the period up to 2035" R&D.

References

- Shaw P, Duncan A, Vouyouka A, Ozsvath K. Radiation Exposure and Pregnancy. *Journal of Vascular Surgery*. 2011;53(1): 28–34. DOI: 10.1016/j.jvs.2010.05.140.
- Preston D, Cullings H, Suyama A, et al. Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors Exposed In Utero or as Young Children. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*. 2008;100(6): 428–436. DOI: 10.1093/jnci/djn045.
- McCullough CH, Schueler BA, Atwell TD, Braun NN, Regner DM, Brown DL, et al. Radiation exposure and pregnancy: when should we be concerned? *Radiographics*. 2007;27(4): 909–917; discussion P. 917–918.
- Akleyev A, Deltour I, Krestinina L, et al. Incidence and Mortality of Solid Cancers in People Exposed in Utero to Ionizing Radiation: Pooled Analyses of Two Cohorts from the Southern Urals, Russia. *PLoS ONE*. 2016;11(8): e0160372. DOI: 10.1371/journal.pone.0160372.
- Krestinina LYu, Kharyuzov YE, Epiphanova SB, et al. Cancer Incidence after in Utero Exposure to Ionizing Radiation in Techa River Residents. *Radiation Research*. 2017;188(3): 314–324. DOI: 10.1667/RR14695.1.
- Shishkina EA, Volchkova AYu, Degteva MO, Napier BA. Evaluation of dose rates in the air at non-uniform vertical distribution of gamma-emitting radionuclides in different types of soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2016;3.: 43–52 (In Russian).
- Shishkina EA, Volchkova AYu, Degteva MO, Napier BA. Dose coefficients to convert air kerma into organ dose rate values for people of different ages externally exposed to ¹³⁷Cs in soil. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti = Radiation Safety Problems*. 2018;3: 36–47 (In Russian).
- Petoussi-Hens N, Satoh D, Schlattl H, Zankl M, Spielmann V. Organ doses of the fetus from external environmental exposures. *Radiation Environmental Biophysics*. 2021;60(1): 93–113. DOI: 10.1007/s00411-020-00891-6.
- Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 47–59. DOI: 10.1007/s00411-014-0570-5.
- The Metabolism of Plutonium and Related Elements. ICRP Publication 48. *Annals of the ICRP*. 1986;16(2-3).
- Doses to the Embryo and Fetus from Intakes of Radionuclides by the Mother. ICRP Publication 88. *Annals of the ICRP*. 2001;31(1–3).
- Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Anspaugh LR, Napier BA. Age and gender specific biokinetic model for strontium in humans. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(1): 87–127.
- Shagina NB, Fell TP, Tolstykh EI, Harrison JD, Degteva MO. Strontium biokinetic model for the pregnant woman and fetus: application to Techa River studies. *Journal of Radiological Protection*. 2015;35(3): 659–676. DOI: 10.1088/0952-4746/35/3/659.

Elena A. Shishkina

Urals Research Center for Radiation Medicine

Address for correspondence: Vorovsky Str., 68A, Chelyabinsk, 454141, Russia; E-mail: lena@urcrm.ru

14. Maynard MR, Shagina NB, Tolstykh EI, Degteva MO, Fell TP, Bolch WE. Fetal organ dosimetry for the Techa River and Ozyorsk Offspring Cohorts, part 2: radionuclide S values for fetal self-dose and maternal cross-dose. *Radiation and Environmental Biophysics*. 2015;54(1): 47-59. DOI: 10.1007/s00411-014-0570-5.
15. Degteva M.O., Tolstykh E.I., Shishkina E.A., et.al. Stochastic Parametric Skeletal Dosimetry model for humans: General description. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16, № 10 P. e0257605. DOI: 10.1371/journal.pone.0257605
16. Sharagin PA, Shishkina EA, Tolstykh EI, Degteva MO. The effect of detailing the trabecular structure of bone phantoms on the assessment of the bone marrow dose from 89,90Sr. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2022;15(4): 7-14. (In Russian) DOI: 10.21514/1998-426X-2022-15-4-7-14.

Received: December 03, 2024

For correspondence: Elena A. Shishkina – Doctor of Biological Sciences, Acting Head of the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency; Associate Professor of the Department of Radiobiology of Chelyabinsk State University (Vorovsky Str., 68A, Chelyabinsk, 454 141, Russia; E-mail: lena@urcrm.ru)

ORCID: 0000-0003-4464-0889

Pavel A. Sharagin – Junior Researcher the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0002-1457-4916

Evgenia I. Tolstykh - Doctor of Biological Sciences, Leading Researcher of the Biophysics Laboratory of the Urals Research Center for Radiation Medicine of Federal Medical Biological Agency, Chelyabinsk, Russia

ORCID: 0000-0002-4958-3214

For citation: Shishkina E.A., Sharagin P.A., Tolstykh E.I. Computer program for calculation of in-utero doses from anthropogenic radionuclides. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2025. Vol. 18, No. 1. P. 121–126. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2025-18-4-121-126