
МЕДИЦИНСКАЯ
ФИЗИКА И БИОФИЗИКА

УДК 574.24;539.12.04;539.16.04;53.072;53.04;611

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЙ РАДИОНУКЛИДОВ В ОРГАНАХ И ТКАНЯХ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

© 2021 г. В. В. Дьячков^{a, b, *}, М. Т. Бигельдиева^a, Ю. А. Зарипова^{a, b}, А. В. Юшков^{a, b}

^aНациональная нанотехнологическая лаборатория открытого типа
при КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

^bКазахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Республика Казахстан

*E-mail: slava_kpss@mail.ru

Поступила в редакцию 31.10.2020 г.

После доработки 09.11.2020 г.

Принята к публикации 10.11.2020 г.

На основе предыдущих исследований, выполненных авторами настоящей работы, было показано, что внешняя среда обитания человека достаточно сильно оказывает влияние на годовое поступление радона и его ДПР в организм человека. В данной работе авторы представили расчетную модель и ее программную реализацию в виде компьютерной программы, которая позволяет выполнять расчеты накопленных доз от различных радионуклидов в органах и тканях тела человека. Данный программно-математический комплекс моделирует распространение радионуклидов по всему организму с учетом экспериментальных коэффициентов перехода от одних органов в другие. Такой математический расчет, основанный на экспериментальных коэффициентах накопления и методах расчета доз МКРЗ, позволяет рассчитать дозы внутреннего облучения соответствующих органов и тканей. Разработана математическая модель транспортировки и накопления природных радионуклидов в органах дыхательной и пищеварительной систем организма человека на основе коэффициентов накопления и переходов для соответствующих органов. Визуализация накопленных доз определенного органа осуществлена на фоне силуэта человека и соответствующей системы организма входящего в ее состав данного органа. Степень “подсвеченных” органов нормируется к предельным дозам санитарных норм Республики Казахстан для данного органа и данного радионуклида. В этом моделировании выполнены расчеты накопленных доз от концентраций радионуклидов в органах дыхательной и пищеварительной систем организма человека. Данный комплекс рассчитан, прежде всего, для выполнения предварительных оценочных расчетных доз в органах от широкого спектра радионуклидов, как в диагностических целях, так и в виде демонстрационного материала на специализированных курсах в радиэкологических и медицинских центрах или в высшем образовании.

Ключевые слова: радионуклиды, накопленная доза, радиоактивное облучение органов и тканей, моделирование поглощенных доз в организме человека, внешнее и внутреннее облучение человека

DOI: 10.56304/S2079562920060160

ВВЕДЕНИЕ

В наши дни особо важное внимание общественных и международных учреждений уделяется рассуждению и созданию путей к обеспечению безопасности населения от природного радиоактивного радона. С точки зрения радиологии радон — это преобладающий источник облучения населения. Вклад радона в общую дозу облучения людей достигает более 50%. Учитывая медицинские последствия действия радона на человеческий организм, стоит учесть то, что Международное агентство по исследованию рака классифицирует радон как канцероген для человека. В настоящее время хорошо установлена связь между раком легкого и облучением радоном в помещениях, при этом указано, что радон второй по значимости (после ку-

рения) фактором риска появления легочной онкологической патологии. По оценкам разных авторитетных международных учреждений, от 3 до 14% случаев рака легких обосновано облучением людей дочерними продуктами распада радона в домах [1]. Принимая эту информацию, защита населения от радона является необходимой научной и практической задачей, решение которой является важным не только в рамках радиологических аспектов, но и получает широкое распространение в вопросе общественного здравоохранения.

Авторами были выполнены исследования механизмов временных вариаций emanации радона и его дочерних продуктов распада (ДПР), а также мониторинг природных бета-радионуклидов в приземном поверхностном атмосферном слое [2–8].

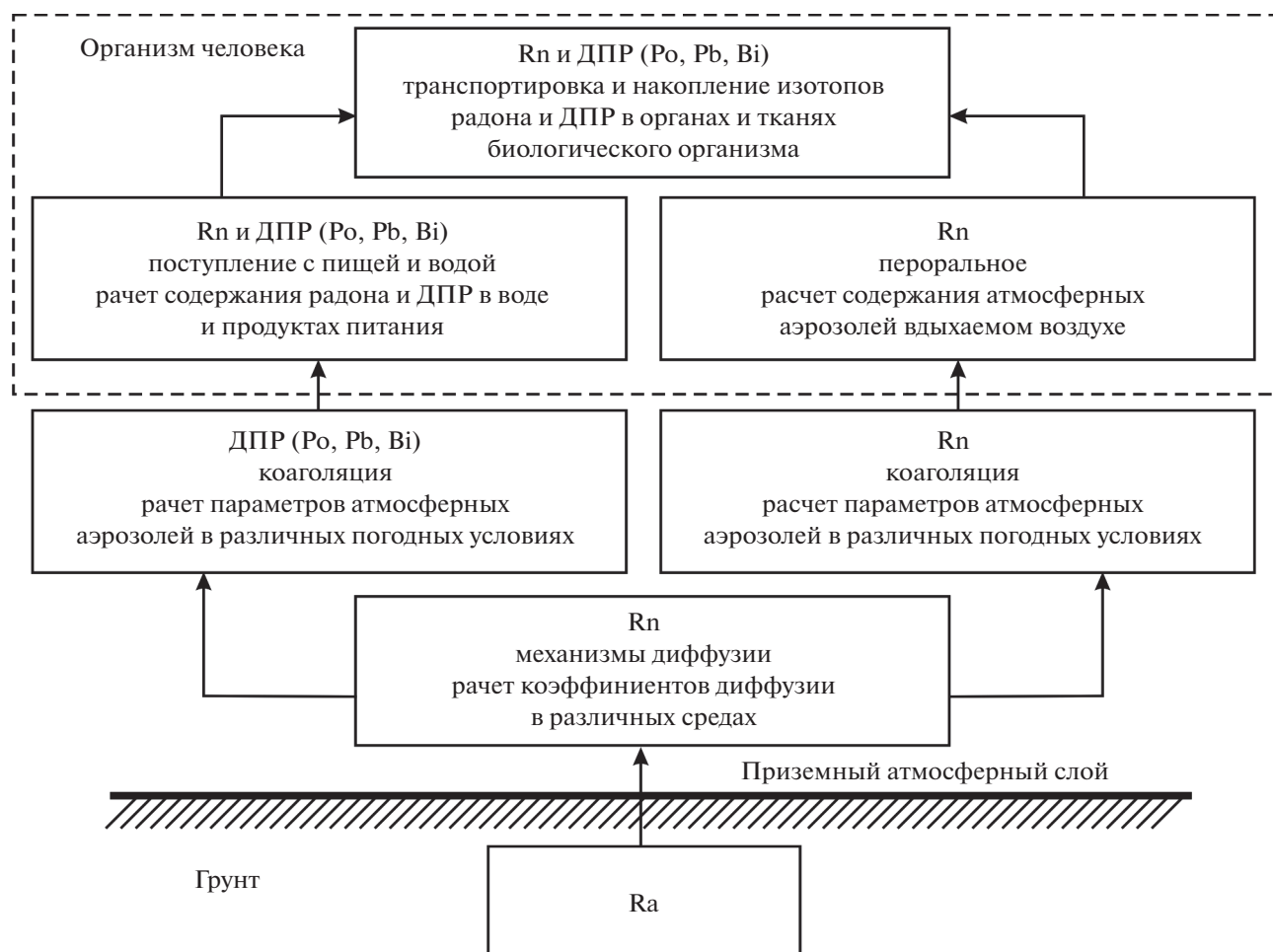


Рис. 1. Блок-схема транспортировки изотопов радона и их ДПР от источника в организм человека и его среды обитания.

На основании этих исследований был сделан ряд важных выводов. После того, как произошли процессы эманации радона из недр на поверхность Земли за счет механизмов газокINETической диффузии, берут старт механизмы диффузии радона в атмосферу. Перемешивание в атмосфере происходит в основном за счет механизма турбулентной диффузии [9]. Такое перемешивание характеризуется большими вариациями, как по амплитуде, так и по частоте и по пространственным координатам. Конвекция возникает из-за неравномерного нагрева земной поверхности Солнцем. Такие неравномерности могут быть местного, регионального и глобального масштабов. В миграции радона существенную роль играет механизм конвекции, которая возникает в результате динамики воздушных струй, вызываемой изменением барометрического давления и вариациями температуры. Изотопы радона и их ДПР сорбируются веществами в различных фазовых состояниях. Адсорбированные атомы радона способны концентрироваться в различных веществах [10] и очень хорошо такие эффекты про-

являют себя в углеводе, что, по-видимому, это относится и к биологическим тканям, что существенно обостряет радоновую опасность и радоновую онкологию. Адсорбирующие свойства на радон различных веществ существенно зависят от температуры, ранее адсорбированных иных газов, влагонасыщенности и многих других параметров, что также необходимо учитывать при расчетах поступления радона и его ДПР в организм. При изучении влияния альфа-излучения на живые организмы авторами была выполнена работа [11]. В этой работе было показано, что возникновение радиационных эффектов на биологических образцах *Drosophila melanogaster* при облучении эталонными альфа-источниками, имитирующими излучение радона, имеется удовлетворительная зависимость возникновения соответствующих эффектов от дозы облучения. Таким образом, внешняя среда обитания человека достаточно сильно оказывает влияние на годовое поступление радона и его ДПР в организм человека. На рис. 1 показаны способы

Таблица 1. Схема распадов ДПР ^{222}Rn

Радионуклид	Тип и вероятность распада	Период полураспада	E , МэВ	ДПР
^{222}Rn	α	3.8235 д	5.590	^{218}Po
^{218}Po	α 99.98%	3.10 мин	6.115	^{214}Pb
	β^- 0.02%		0.265	^{218}At
^{218}At	α 99.90%	1.5 с	6.874	^{214}Bi
	β^- 0.10%		2.883	^{218}Rn
^{218}Rn	α	35 мс	7.263	^{214}Po
^{214}Pb	β^-	26.8 мин	1.019	^{214}Bi
^{214}Bi	β^- 99.98%	19.9 мин	3.272	^{214}Po
	α 0.02%		5.617	^{210}Tl
^{214}Po	α	0.1643 мс	7.883	^{210}Pb
^{210}Tl	β^-	1.30 мин	5.484	^{210}Pb
^{210}Pb	β^-	22.3 года	0.064	^{210}Bi
^{210}Bi	β^- 99.99987%	5.013 сут	1.161	^{210}Po
	α 0.00013%		5.036	^{206}Tl
^{210}Po	α	138.376 сут	5.407	^{206}Pb
^{206}Tl	β^-	4.202 мин	1.532	^{206}Pb
^{206}Pb		Стабильный		

транспортировки и доставки изотопов радона и их ДПР в организм человека.

Основные природные радионуклиды, поступающие в организм и образующиеся за счет долгоживущего изотопа радона одной из трех природных семейств радиоактивного распада, представлены в таблице. Внешние условия природного радиационного фона непосредственно формируют поступление природных радионуклидов в организм человека и, в зависимости от их химических свойств, концентрируются в соответствующих органах человека. Изучая накопление природных радионуклидов в различных органах человека и их дальнейшее влияние на биологические процессы, предоставляется возможность предупредить и, уже на ранней стадии, выявлять возможные потенциально опасные радиогенные онкологические заболевания [12–21]. В связи с этим была поставлена задача о разработке модели распределения концентраций природных радионуклидов в органах и тканях тела человека.

В настоящей работе авторами была предложена компьютерная модель, позволяющая выполнить предварительные оценочные расчеты доз радионуклидов в органах и тканях тела человека.

ОПИСАНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Распределение химических элементов в отдельных живых организмах (включая организм человека), так же как и в их совокупности, подчиняется

общим геохимическим законам Менделеева–Кларка и Оддо–Гаркинса. В мировой литературе известны такие работы как [22–26], в которых были выполнены измерения концентраций химических элементов в различных органах и тканях организма человека. С точки зрения попадания и концентрации природных радионуклидов на диаграмме коэффициентов накопления элементов в органах и тканях человека по Глазовскому (взято из [27]) интересен коэффициент накопления изотопов свинца, как конечного, так и висмута — промежуточного продукта распадов ДПР изотопов радона.

Разработка модели транспортировки и накопления природных радионуклидов в органах дыхательной и пищеварительной систем организма человека выполнялась на основе коэффициентов накопления и переходов для соответствующих органов, полученных в [27].

Математическое описание модели поступления ^{222}Rn в организм человека с учетом распада его ДПР по наиболее вероятной цепи распада описывается девятью дифференциальными уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dN_1(t)}{dt} &= -\lambda_1 N_1(t), \quad \frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t), \\ \frac{dN_3(t)}{dt} &= \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t), \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

что позволит вычислить спектры альфа-излучения и потоки соответствующих энергий альфа-частиц, а также верхние границы сплошных спек-

тров бета- радионуклидов, которые образуются в процессе последовательной серии радиоактивных распадов данного долгоживущего изотопа радона ^{222}Rn . В процессе распада радона и превращения его в ДПР других химических элементов с учетом соответствующих коэффициентов [27] будет происходить распределение и аккумуляция радионуклидов в органах и тканях тела человека. При этом, будет происходить облучение органов во время транспортировки радионуклида ДПР и аккумуляции к в конечном органе. Тогда орган будет поглощать энергию, зависящую от текущего радионуклида претерпевающего соответствующий тип распада во временном интервале характеризующим его пребывание в данном органе

$$\sum_i \left[A_i (k_T)_i (k_A)_i \sum_j E_j (\alpha, \beta, \gamma) n_{ij} \right] dt, \quad (2)$$

где A_i – активность данного радионуклида $A_i = \frac{dN_i}{dt}$ в текущий момент времени; n_{ij} – интенсивность спектра данного радионуклида; $E_j (\alpha, \beta, \gamma)$ – энергетический спектр излучения соответствующего вида излучения; k_T – коэффициент перехода из одного органов в другой и в кровь [27]; k_A – коэффициент накопления в соответствующем органе [27]; dt – временной интервал. При этом скорость перемещения радионуклида, образовавшегося в результате цепочки последовательных распадов, от одного органа к другому будет зависеть от его химических свойств и свойств данного органа, что в этой модели соответствуют экспериментальным коэффициентам перехода и накопления указанных выше.

В компьютерной реализации данной математической модели выполнены расчеты только статических процессов, т.е. с учетом коэффициентов накопления в соответствующих органах дыхательной и пищеварительной систем. Не учтены динамические процессы, связанные с транспортировкой радионуклидов в организме человека. В этой упрощенной реализации математической модели расчет дозы в теле человека, от поступившего радионуклида с учетом его коэффициента накопления в органах и тканях, вычисляется как

$$D = \frac{\varepsilon \bar{E} 1.6 \cdot 10^{-13} A (k_A)_i (k_R)_i}{m_j}, \quad (3)$$

где ε – средняя эффективность поглощения гамма-квантов в организме человека; \bar{E} – усредненная энергия, излучаемая радионуклидом при одном акте распада радионуклида; A – активность радионуклида в Бк; k_A – коэффициент накопления элементов в органах и тканях человека для данного радионуклида [22]; k_R – дозовый коэффици-

ент воздействия Зв/Бк [28–31]; m_j – масса органа или ткани человека; i – радионуклид; j – орган.

Относительная доза радионуклида, отнесенная к норме для “персонала” в процентах, вычислена по

$$\bar{D} = \frac{D}{D_{\text{ПГП}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $D_{\text{ПГП}}$ – предел годового поступления [28–31].

ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛИ

В настоящее время существует достаточное множество различных математических пакетов и программ, моделирующих прохождение ядерного излучения через биологическое вещество. Так, например, любой линейный ускоритель, предназначенный для лучевой гамма-терапии в ядерной медицине сопровождается мощным специализированным программным комплексом планирования способа воздействия излучения на тот или иной орган с учетом геометрии пучка и расчета доз органов попавших в область облучения. Помимо коммерческих подобных программных комплексов, моделирующих взаимодействие излучений с биологическими объектами, существуют, например, как Geant4-DNA и др. [9]. Такие программно-расчетные комплексы либо недоступны, либо достаточно сложны.

Разработанный программно-математический комплекс моделирует распространение радионуклидов по всему организму, используя экспериментальные коэффициенты. Таким образом, математический расчет, основанный на экспериментальных коэффициентах накопления, позволяет рассчитать дозы внутреннего облучения соответствующих органов и тканей. Такое моделирование позволяет вычислить риски возникновения онкологических заболеваний за счет внутреннего облучения поступивших природных радионуклидов.

На рис. 2 представлен интерфейс выбора радионуклида из базы [32, 33], которая содержит в себе значения дозовых коэффициентов [28–31] и другие физические свойства.

В результате расчета в диалоговом окне “Распределение дозовой нагрузки радионуклидов в организме человека” будет представлена интерпретация результатов расчета (рис. 3–5).

В данной программной версии не рассматривается дифференциация по полу признаку, а также не разделены другие системы и в связи с этим в окне для остальных органов частично размещены эндокринная, сердечно-сосудистая и мочеполовая системы (рис. 5). Одной из приоритетных задач программной реализации модели это визуализация основных органов и тканей организма чело-

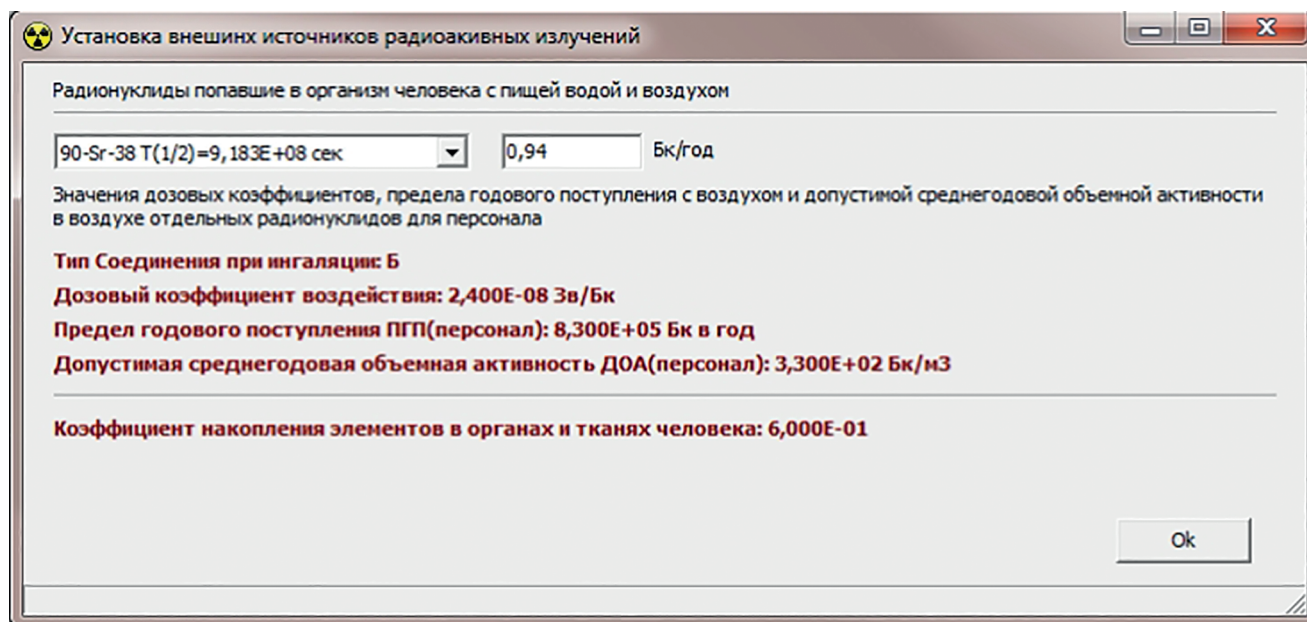


Рис. 2. Установка внешних источников радиоактивных излучений.

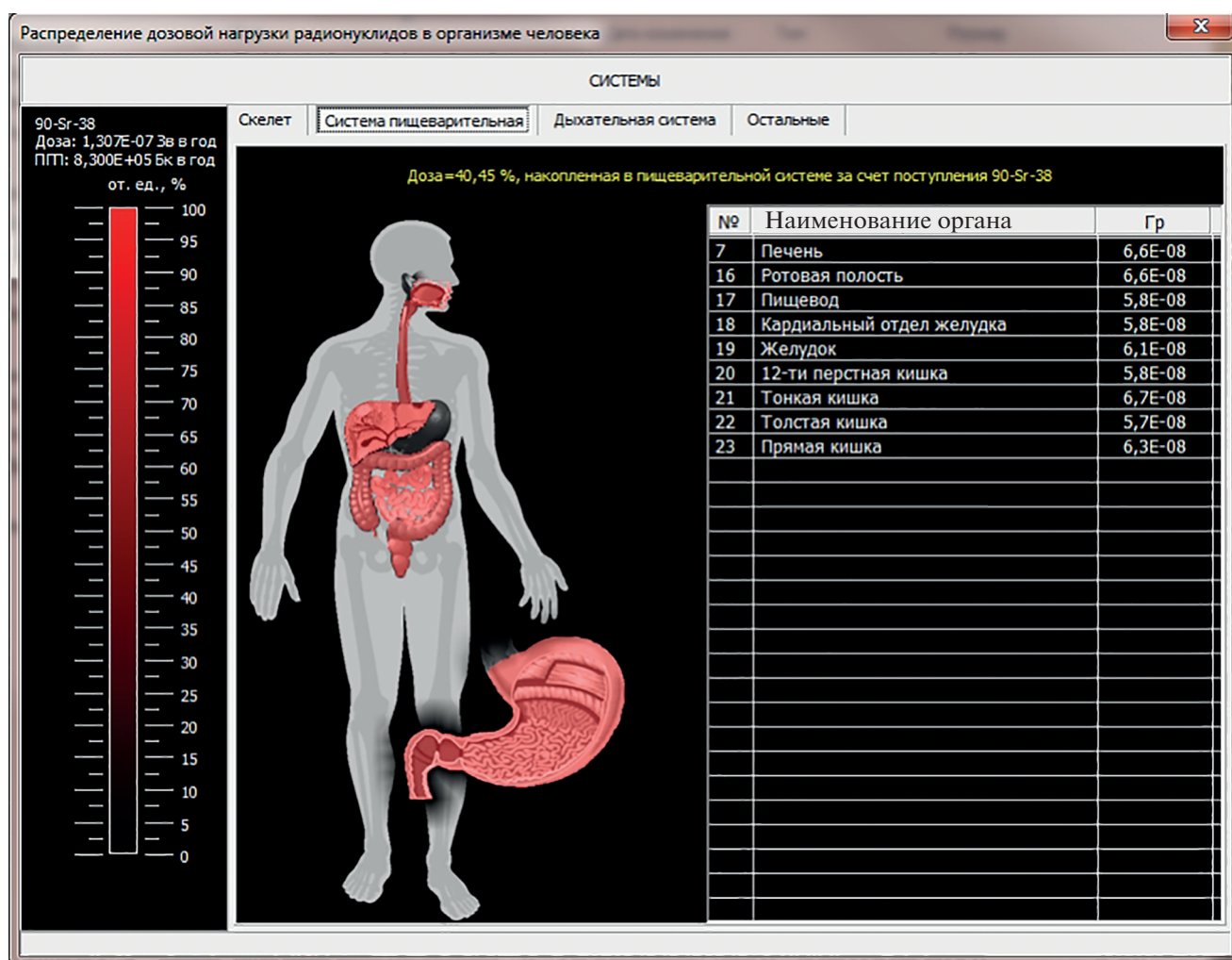


Рис. 3. Распределение дозовой нагрузки радионуклидов в органах пищеварительной системы организма человека.

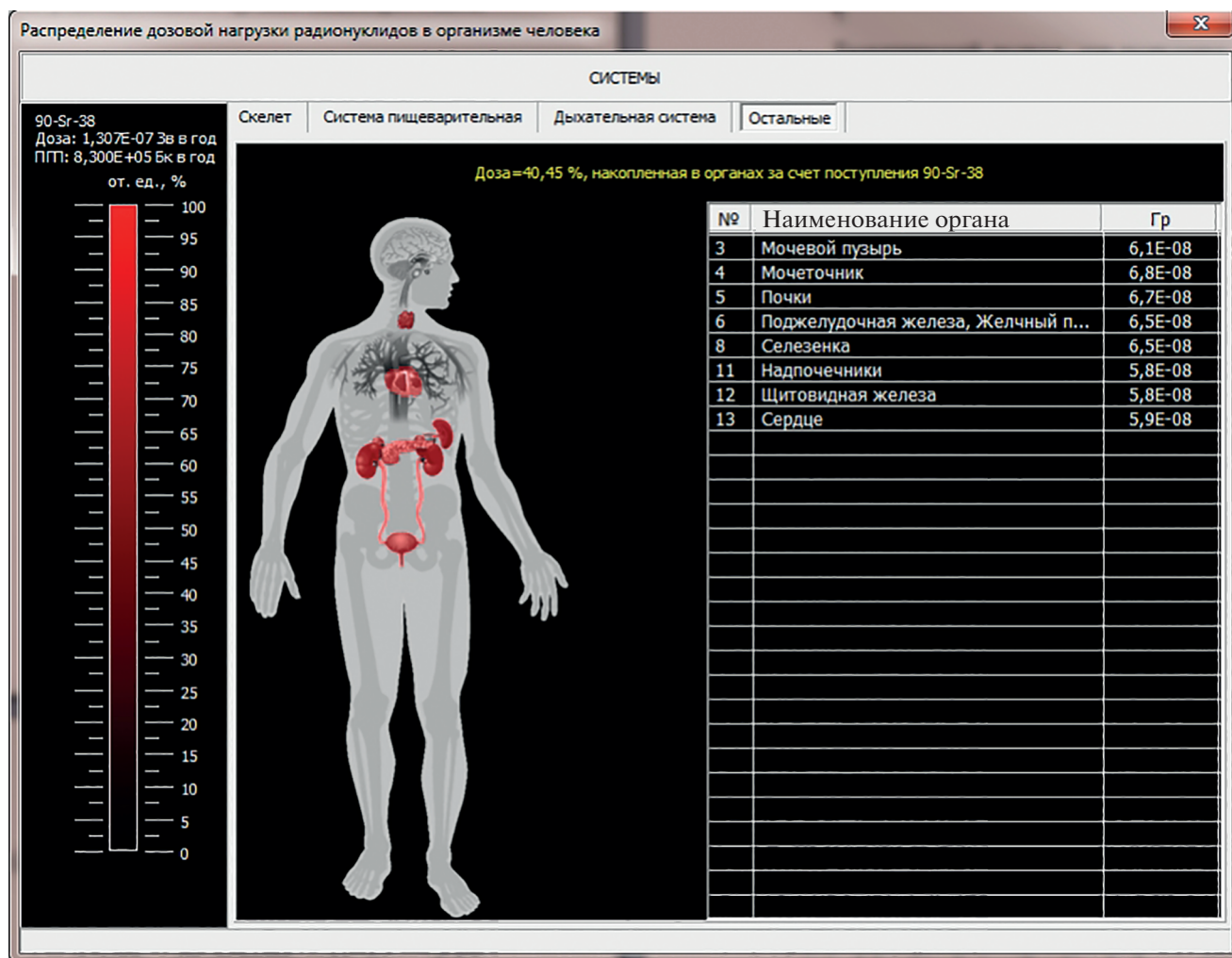


Рис. 5. Распределение дозовой нагрузки радионуклидов в остальных органах организма человека.

ного материала на специализированных курсах в радиоэкологических и медицинских центрах или в высшем образовании.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполняется при поддержке государственного грантового финансирования фундаментальных исследований (проект № ИРН АР09258978, АР09058404), на базе выполненных исследований (проект № ИРН АР05131884).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Публикация 50 МКРЗ. 1992. Москва: Энергоатомиздат.
2. Дьячков В.В., Бияшева З.М., Комаров А.А. и др. // Вестник КазНУ. Сер. физ. 2016. № 1 (56). С. 120–128.
3. Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V. et al. // Phys. Sci. Technol. 2017. V. 4. (1). P. 20–26.
4. Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V. et al. // Recent Contrib. Phys. 2018. V. 67 (4). P. 4–10.
5. Дьячков В.В., Зарипова Ю.А., Юшков А.В. и др. // Ядерная физика и инжиниринг. 2018. Т. 9. № 2. С. 204–210.
6. Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V. et al. // Phys. At. Nucl. 2018. V. 81 (10). P. 1509–1514.
7. Dyachkov V.V., Zaripova Yu.A., Yushkov A.V. et al. // Phys. Sci. Technol. 2019. V. 6(1). P. 11–17.
8. Dyachkov V.V., Biyasheva Z.M., Ismagulova D.A. // Contrib. Phys. 2019. No. 3 (70). P. 23–28.
9. Публикация 65 МКРЗ. 1995. Москва: Энергоатомиздат.
10. Смагулова Г.К., Бажко Е.В., Дьячков В.В., Юшков А.В. // Сб. материалов конференции. 2009. Алматы: АТУ. С. 101–104.
11. Бияшева З.М., Тлеубергенова М.Ж., Зарипова Ю.А. и др. // Радиационная генетика. 2020. Т. 60. № 5. С. 507–515.
12. Lecomte J.F., Solomon S., Takala J. et al. // ICRP Pub. 126. Ann. ICRP. 2014. V. 43 (3). P. 5–73.
13. EPA Publ. No. 402-R-1107 03-003. 2003. Washington: U.S. Environ. Protect. Agency.

14. *Lochard J., Bogdevitch I., Gallego E. et al.* // ICRP Pub. 111. Ann. ICRP. 2009. V. 39 (3). P. 7–62.
15. *Tirmarche M., Harrison J.D., Laurier D. et al.* // ICRP Pub. 115. Ann. ICRP. 2010. V. 40(1). P. 1–64.
16. *Paquet F., Etherington G., Bailey M.R., et al.* // ICRP Pub. 130. Part 1. Ann. ICRP. 2015. V. 44(2). P. 5–188.
17. *Paquet F., Bailey M.R., Leggett R.W. et al.* // ICRP. Pub. 137. Part 3. Ann. ICRP. 2017. V. 46 (3–4) P. 1–486.
18. *Okade S.* // Mem. College Sci. 1956. V. 28. P. 99–115.
19. *Левин М.Н., Негрбов О.П., Гитлин В.Р., Селиванова О.В.* // Природный радиационный фон. 2008. Воронеж: Изд-во ВГУ.
20. *Жуковский М. В., Ярмошенко И. В., Кирдин И. А. и др.* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2003. Т. 48. № 2. С. 5–17.
21. *Ярмошенко И.В., Кирдин И.А., Жуковский М.В., Астраханцева С.Ю.* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2003. Т. 48. № 5. С. 33–43.
22. *Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Игнатова Т.Н. и др.* // Геохимия. 2011. № 7 (49). С. 779–784.
23. *Рихванов Л.П., Арбузов С.И., Архангельская Т.А. и др.* // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2006. № 2. С. 41–51.
24. *Рихванов Л.П., Барановская Н.В., Игнатова Т.Н. и др.* // Проблемы биогеохимии и геохимической экологии. 2009. № 9. С. 67–76.
25. *Барановская Н.В., Игнатова Т.Н., Рихванов Л.П.* // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 339. С. 182–188.
26. *Игнатова Т.Н., Барановская Н.В., Рихванов Л.П. и др.* // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 1. С. 178–183.
27. *Барановская Н.В.* // Дис. д. б. н. Томск. 2011.
28. *Нормы радиационной безопасности НРБ-99.* Республика Казахстан. 1999.
29. *Гигиенические нормативы.* Республика Казахстан. 2015. № 155.
30. *Санитарные правила.* Республика Казахстан. 2019. № КР ДСМ-97.
31. *Санитарные правила.* Республика Казахстан. 2015. № 260.
32. *Дьячков В.В.* // Справочник атомных ядер — NDBR & С. Св. авт. права № 344. 2012. ИС0008104.
33. *Дьячков В.В.* // Справочник атомов — ADBR & С. Св. авт. права № 424. 2012. ИС0008186.

Modeling of the Distribution of Radionuclide Concentrations in Organs and Tissues of the Human Body

V. V. Dyachkov^{1, 2, *}, M. T. Bigeldiyeva¹, Yu. A. Zaripova^{1, 2}, and A. V. Yushkov^{1, 2}

¹National Nanotechnology Laboratory of Open Type, Almaty, Republic of Kazakhstan

²Al-Farabi KazNU, Almaty, Republic of Kazakhstan

*e-mail: slava_kpss@mail.ru

Received October 31, 2020; revised November 9, 2020; accepted November 10, 2020

Abstract—On the basis of previous studies carried out by the authors of this work, it was shown that the external environment of a person has a rather strong effect on the annual intake of radon and its daughter decay products into the human body. In this paper, the authors presented a computational model and its software implementation in the form of a computer program that allows calculating the accumulated doses from various radionuclides in organs and tissues of the human body. This software and mathematical complex simulates the spread of radionuclides throughout the body, taking into account the experimental coefficients of transition from one organ to another. Such a mathematical calculation, based on the experimental accumulation factors and methods for calculating the ICRP doses, makes it possible to calculate the internal radiation doses of the corresponding organs and tissues. A mathematical model has been developed for the transportation and accumulation of natural radionuclides in the organs of the respiratory and digestive systems of the human body on the basis of the accumulation and transition coefficients for the corresponding organs. The visualization of the accumulated doses of a certain organ is carried out against the background of a person's silhouette and the corresponding body system of this organ that is part of it. The degree of “highlighted” organs is normalized to the maximum doses of sanitary norms of the Republic of Kazakhstan for this organ and this radionuclide. In this simulation, the calculations of the accumulated doses from the concentrations of radionuclides in the respiratory and digestive systems of the human body are performed. This complex is designed, first of all, to perform preliminary estimated doses in organs from a wide range of radionuclides, both for diagnostic purposes and in the form of demonstration material at specialized courses in radioecological and medical centers or in higher education.

Keywords: radionuclides, accumulated dose, radioactive irradiation of organs and tissues, modeling of absorbed doses in the human body, external and internal human exposure