

В.Э. Введенский

ГАРМОНИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ РАСТВОРЕНИЯ НУКЛИДОВ, ПРЕДЛОЖЕННЫХ ЮЖНО-УРАЛЬСКИМ ФЕДЕРАЛЬНЫМ НАУЧНО-КЛИНИЧЕСКИМ ЦЕНТРОМ МЕДИЦИНСКОЙ БИОФИЗИКИ И ICRP-66

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики, Озерск

Контактное лицо: Владимир Эдуардович Введенский, e-mail: vvedensky@sucmb.su

РЕФЕРАТ

Цель: Проанализировать последствия использования транспортабельности вместо доли нуклида f_r , которая переходит в кровь с относительно большей скоростью в ранней фазе легочного клиренса для улучшения качества моделей метаболизма нуклида, построенных на основе Публикации 66 МКРЗ (ICRP-66).

Материал и методы: В биофизической лаборатории Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики растворимость промышленных соединений плутония с технологических участков Производственного объединения «МАЯК» определялась методом диализа в физиологическом растворе Рингера и характеризовалась показателем транспортабельности, который является количественным критерием для классификации промышленных аэрозолей. В рамках теории транспортабельности наблюдаемая двух стадийная кинетика диализа объясняется тем, что твердая фаза аэрозоля представлена двумя фракциями: быстрой (транспортабельной) и медленной. Транспортабельная фракция достаточно быстро покидает твердую фазу и перемещается в раствор, будучи заведомо готовой к этому. Модель дыхательного тракта ICRP-66 предлагает три класса растворимости ингалируемого аэрозоля F, M и S, и устанавливает для этих классов параметры абсорбции из дыхательной системы в кровь. В моделях Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики (до MWDS-2013 включительно) доля нуклида f_r , которая переходит в кровь с относительно большей скоростью в ранней фазе легочного клиренса, после осаждения в дыхательном тракте, приравнена к показателю транспортабельности S , выраженной в долях.

Результаты: Показано, что теоретическая процентная разница между f_r и S относительно f_r не превышает 4,36% для диоксида плутония и смешанного состава, а для нитрата плутония она менее 1%, но из-за использования в вычислениях округленных значений S , процентная разница может находиться в пределах от –24% до 18%.

Заключение: Показана приемлемость использования транспортабельности вместо доли нуклида f_r из ICRP-66. Предложен возможный путь улучшения качества моделей метаболизма нуклида.

Ключевые слова: метаболизм нуклида, модель растворения, модель дыхательных путей, промышленные аэрозоли, диоксид плутония, транспортабельность, раствор Рингера

Для цитирования: Введенский В.Э. Гармонизация моделей растворения нуклидов, предложенных Южно-Уральским федеральным научно-клиническим центром медицинской биофизики и ICRP-66 // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 5. С. 61–64. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-5-61-64

V.E. Vvedensky

Harmonization of Nuclide Dissolution Models Proposed by the Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics and ICRP-66

Southern Urals Research and Clinical Center, Ozersk, Russia

Contact person: V.E. Vvedensky, e-mail: vvedensky@sucmb.su

ABSTRACT

Purpose: To analyze the consequences of using transportability instead of the fraction of the nuclide f_r that enters the blood at a relatively higher rate in the early phase of pulmonary clearance. To demonstrate potential ways to improve the quality of nuclide metabolism models built on the basis of ICRP 66.

Material and methods: In the biophysical laboratory of the Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics, the solubility of industrial plutonium compounds from the process areas of the MAYAK Production Association was determined by dialysis in physiological Ringer's solution and characterized by the transportability, which is a quantitative criterion for classifying industrial aerosols. Within the framework of transportability theory, the observed two-stage dialysis kinetics is explained by the fact that the solid phase of the aerosol is represented by two fractions: fast (transportable) and slow. The transportable fraction leaves the solid phase relatively quickly and moves into solution, being predisposed to do so. The ICRP-66 respiratory tract model proposes three solubility classes of inhalable aerosol: F, M, and S, and establishes absorption parameters from the respiratory system into the blood for these classes. In the models of the Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics (up to and including MWDS-2013), the fraction of the nuclide f_r that enters the blood at a relatively higher rate in the early phase of pulmonary clearance after deposition in the respiratory tract is equated to the transportability, expressed as a fraction.

Results: The article shows that the theoretical percentage difference between f_r and S relative to f_r does not exceed 4.36% for plutonium dioxide and mixed composition, and less than 1% for plutonium nitrate. However, due to the use of rounded S values in the calculations, the percentage difference can range from –24% to 18%.

Conclusion: The acceptability of using transportability instead of the nuclide fraction f_r from ICRP 66 is demonstrated. A way to improve the quality of nuclide metabolism models is proposed.

Keywords: nuclide metabolism, dissolution model, respiratory tract model, industrial aerosols, plutonium dioxide, transportability, Ringer's solution

For citation: Vvedensky VE. Harmonization of Nuclide Dissolution Models Proposed by the Southern Urals Research and Clinical Center for Medical Biophysics and ICRP-66. Medical Radiology and Radiation Safety. 2026;71(5):61–64. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-5-61-64

Введение

Модель дыхательного тракта ICRP-66¹ предлагает три класса растворимости ингалируемого аэрозоля F, M и S, и устанавливает для этих классов параметры абсорбции из дыхательной системы в кровь. Традиционно в биофизической лаборатории Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики (ЮУрФНКЦ МБ) растворимость промышленных соединений плутония с технологических участков Производственного объединения «МАЯК» (ПО «Маяк») определялась методом диализа в физиологическом растворе Рингера и характеризовалась показателем транспортабельности, который является количественным критерием для классификации промышленных аэрозолей, как правило, состоящих из смеси различных соединений плутония. В моделях ЮУрФНКЦ МБ, до MWDS-2013 включительно [1, 2], доля нуклида² f_r , которая переходит в кровь с относительной большей скоростью в ранней фазе легочного клиренса после осаждения в дыхательном тракте, приравнена к показателю транспортабельности S , выраженной в долях и измеренной в растворе Рингера [3]:

$$f_r \equiv S \quad (1)$$

В связи с вышесказанным, возникает вопрос: насколько правомерно использование соотношения (1).

В данной статье проанализированы последствия использования транспортабельности вместо доли нуклида (1), и показаны возможные пути улучшения качества моделей метаболизма нуклида, построенных на основе ICRP-66.

Материал и методы

В рамках теории транспортабельности наблюдаемая двухстадийная кинетика диализа объясняется тем, что твердая фаза аэрозоля представлена двумя фракциями: быстрой (транспортабельной) и медленной [4, 5]. Математически этот процесс описывается уравнениями вида (рис. 1):

$$\begin{aligned} \frac{dQ_1}{dt} &= -\lambda_1 Q_1 + \lambda_2 Q_2 \\ \frac{dQ_2}{dt} &= -\lambda_2 Q_2 \end{aligned} \quad \lambda_1 > \lambda_2 > 0 \quad (2)$$

где Q_1 – активность транспортабельной фракции, Бк; Q_2 – активность нетранспортабельной фракции, Бк; λ_1 – скорость убывания активности радионуклида за счет массопереноса радиоактивного вещества во внешний раствор, сут⁻¹; λ_2 – скорость перехода активности радионуклида в транспортабельное состояние за счет растворения и разрушения крупных частиц, сут⁻¹.

Принимая начальное содержание радиоактивного вещества на фильтре равным Q_0 , а долю активности радио-

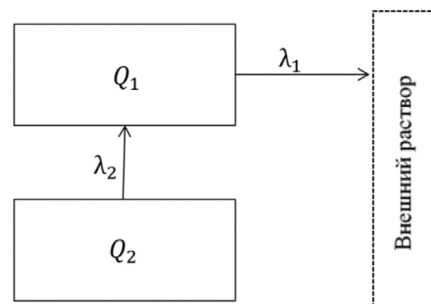


Рис. 1. Камерная модель системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка (2)

Fig. 1. Compartment model of the system of linear differential equations of the first order (2)

нуклида, находящуюся в транспортабельном состоянии, равной S , начальные условия будут иметь вид:

$$\begin{aligned} Q_1|_{t=0} &= Q_0 S \\ Q_2|_{t=0} &= Q_0 (1 - S) \end{aligned} \quad 1 > S > 0 \quad (3)$$

Решая систему уравнений (2) при начальных условиях (3), можно получить выражение, которое описывает активность аэрозольных частиц, находящихся на фильтре в зависимости от продолжительности процесса диализа $Q(t)$, следующего вида (рис. 2):

$$Q(t) = Q'_1 + Q'_2 = Q_0 [a \times e^{-\lambda_1 t} + (1-a)e^{-\lambda_2 t}], \quad \lambda_1 > \lambda_2 > 0 \quad (4)$$

где Q_0 – это начальное содержание активности радионуклида на фильтре. Начальные условия будут иметь вид:

$$\begin{aligned} Q'_1|_{t=0} &= Q_0 a \\ Q'_2|_{t=0} &= Q_0 (1 - a) \end{aligned} \quad 1 > a > 0 \quad (5)$$

Из (2–5) получаем долю активности радионуклида, находящуюся в транспортабельном состоянии, так называемую транспортабельность [4]:

$$S = a + \frac{(1-a)\lambda_2}{\lambda_1}, \quad \lambda_1 > \lambda_2 > 0 \quad (6)$$

При использовании моделей метаболизма нуклида, построенных на основе ICRP-66³, возникает проблема, связанная с тем, что растворимость в ICRP-66 (рис. 3) определяется иначе, чем транспортабельность в ЮУрФНКЦ МБ (рис. 1).

Связь между моделями А и В на рис. 3 следующая⁴:

$$\begin{aligned} s_p &= s_s + f_r(s_r - s_s) \\ s_{pt} &= (1-f_r)(s_r - s_s) \\ s_t &= s_s \end{aligned} \quad (7)$$

¹ ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1–3).

² Там же.

³ ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1–3).

⁴ Там же.

Результаты и обсуждение

При рассмотрении камерной модели на рис. 2 и модели А на рис. 3 очевидно, что изображена одна и та же модель, и, следовательно, соотношения между параметрами моделей следующие:

$$\begin{aligned} s_r &\equiv \lambda_1 \\ s_s &\equiv \lambda_2 \\ f_r &\equiv a \end{aligned} \quad (8)$$

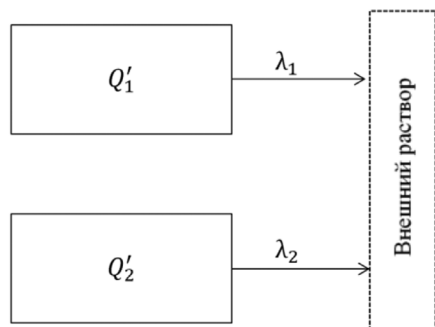


Рис. 2. Камерная модель системы линейных дифференциальных уравнений первого порядка (2)

Fig. 2. Compartment model of the system of linear differential equations of the first order (2)

Следовательно, соотношения между моделями, изображенными на рис. 1 и модели А на рис. 3 следующие:

$$\begin{aligned} s_r &\equiv \lambda_1 \\ s_s &\equiv \lambda_2 \\ f_r &\equiv (S \times \lambda_1 - \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2) \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение (9) дает реальное соотношение между f_r и S . При условии $\lambda_1 \gg \lambda_2$, которое выполняется для аэрозолей диоксида плутония (табл. 1) [3], соотношение (1) приближенно верно. Оценим систематическую погрешность, вносимую в модель растворимости ICRP-66 при использовании (1). Для этого воспользуемся результатами исследований динамики растворения исследуемых аэрозолей плутония в растворе Рингера, представленные в табл. 1 [3]. Процентная разница между измеренным f_r и вычисленным S (табл. 1) относительно f_r не превышает 4,36% для диоксида плутония и смешанного состава, а для нитрата плутония она менее 1%.

Таблица 1

Параметры растворения аэрозолей диоксида плутония в растворе Рингера на литейно-механическом и химико-металлургическом участках плутониевого производства ПО «Маяк» [3]

Parameters of dissolution of plutonium dioxide aerosols in Ringer's solution at the casting-mechanical and chemical-metallurgical sections of the plutonium production facility of the Mayak Production Association [3]

Тип соединения	Фракция, способная к быстрому растворению a , %	Скорость убывания быстрорастворимой фракции λ_1 , сут ⁻¹	Фракция, подвергаемая медленному растворению $(1-a)$, %	Скорость убывания медленно растворимой фракции λ_2 , сут ⁻¹	Транспортабельность S , %
Диоксид плутония	0,34	2,19	99,56	0,0003	0,35
Нитрат плутония	2,53	4,59	97,47	0,0011	2,55
Аэрозоли смешанного состава (диоксид и нитрат плутония)	1,32	0,86	98,68	0,0005	1,38



Рис. 3. Две эквивалентные камерные модели растворения А и В, зависящие от времени, предложенные ICRP-66

Примечание: ICRP, 1994. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24 (1-3)

Fig. 3. Two equivalent time-dependent dissolution compartment models: A and B proposed by ICRP-66

Заключение

Показано, что соотношение (1), используемое в моделях ЮУрФНКЦ МБ (до MWDS-2013 включительно) приближенно верно для аэрозолей диоксида плутония. Это следует из (9) при условии $\lambda_1 \gg \lambda_2$, которое выполняется в табл. 1. Процентная разница между измеренным f_r и вычисленным S относительно f_r не превышает 4,36 % для диоксида плутония и смешанного состава, а для нитрата плутония она менее 1 %. В моделях метаболизма нуклидов ЮУрФНКЦ МБ вместо значений транспортабельности, указанной в табл. 1 (колонка 6), в расчетах использовались округленные значения транспортабельности {0,3%, 3%, 1%}. Процентная разница между f_r и округленными значениями S относительно f_r составляла {-11%, 18%, -24%} соответственно. Это показывает возможные пути улучшения качества моделей метаболизма нуклида, построенных на основе ICRP-66: для того, что бы убрать систематическую погрешность, вызванную использованием соотношения (1), необходимо вместо (1) использовать соотношение $f_r \equiv a$ (табл. 1 колонка 2).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotnin V.V., Vvedensky V.E., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Birchall A., Miller S.C., Schadilov A.E., Ephimov A.V. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of Internal Dose from Measurement Results of Plutonium Activity in Urine // *Health Phys.* 2013. V.104. No.4. P. 366-78. Doi: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60. PMID: 23439140.
2. Vostrotnin V.V., Napier B.A., Zhdanov A.V., Miller S.C., Sokolova A.B., Bull R.K., et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2016): Internal Dosimetry Results and Comparison with MWDS-2013 // *Radiation Protection Dosimetry.* 2019. V.184. No.2. P. 201-210. Doi: 10.1093/rpd/ncy200.
3. Аладова Е.Е., Бобов Г.Н., Введенский В.Э., Жданов А.Н., Меленьтьева Р.В., Сыпко С.А. и др. Физико-химические характеристики промышленных альфа-излучающих аэрозолей: данные многолетних исследований: Монография. СПб.: Наукоемкие технологии, 2023. 382 с.
4. Хохряков В.Ф., Сулова К.Г., Цевелева И.А., Аладова Е.Е. Объективный способ классификации альфа-активных аэрозолей для целей дозиметрии внутреннего облучения // *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 1998. №4. С. 14-45.
5. Сыпко С.А., Введенский В.Э., Ишунина М.В., Сулова К.Г. Метод косвенного расчета стандартной неопределенности при оценке транспортабельности производственных альфа-излучающих аэрозолей // *Вопросы радиационной безопасности.* 2020. №1. С. 75-81.

REFERENCES

1. Khokhryakov V.V., Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Vostrotnin V.V., Vvedensky V.E., Sokolova A.B., Krahenbuhl M.P., Birchall A., Miller S.C., Schadilov A.E., Ephimov A.V. Mayak Worker Dosimetry System 2008 (MWDS-2008): Assessment of Internal Dose from Measurement Results of Plutonium Activity in Urine. *Health Phys.* 2013;104;4:366-78. Doi: 10.1097/HP.0b013e31827dbf60. PMID: 23439140.
2. Vostrotnin V.V., Napier B.A., Zhdanov A.V., Miller S.C., Sokolova A.B., Bull R.K., et al. The Mayak Worker Dosimetry System (MWDS-2016): Internal Dosimetry Results and Comparison with MWDS-2013. *Radiation Protection Dosimetry.* 2019;184;2:201-210. Doi: 10.1093/rpd/ncy200.
3. Aladova Ye.Ye., Bobov G.N., Vvedenskiy V.E., Zhdanov A.N., Melen't'yeva R.V., Sytko S.A., et al. *Fiziko-Khimicheskiye Kharakteristiki Promyshlennykh Alfa-Izluchayushchikh Aerozolei: Dannyye Mnogoletnikh Issledovaniy* = Physicochemical Characteristics of Industrial Alpha-Emitting Aerosols: Data from Long-Term Studies. Monograph. St. Petersburg, Naukoemkiye Tekhnologii Publ., 2023. 382 p. (In Russ.).
4. Khokhryakov V.F., Suslova K.G., Tseveleva I.A., Aladova Ye.Ye. Objective Method for Classifying Alpha-Active Aerosols for Internal Exposure Dosimetry Purposes. *Meditsinskaya Radiologiya i Radiatsionnaya Bezopasnost'* = Medical Radiology and Radiation Safety. 1998;4:14-45 (In Russ.).
5. Sytko S.A., Vvedenskiy V.E., Ishunina M.V., Suslova K.G. Method of Indirect Calculation of Standard Uncertainty in Assessing the Transportability of Industrial Alpha-Emitting Aerosols. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti* = Radiation Safety Problems. 2020;1:75-81 (In Russ.).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Работа выполнена в рамках в рамках Государственного контракта № 11.306.202.5 от 10.06.2025 г. на выполнение прикладной научно-исследовательской работы «Совершенствование технологий дозиметрии внутреннего облучения персонала радиационно-опасных производств» (шифр «Радиометрия 25–27») в рамках федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 гг. и на период до 2035 г.», финансируемого ФМБА России.

Участие авторов. Статья подготовлена одним автором.

Поступила: 20.04.2026. Принята к публикации: 25.05.2026.

Conflict of interest. The author declare no conflict of interest.

Financing. The work was carried out within the framework of State Contract No. 11.306.202.5 dated 10.06.2025 for the implementation of applied research work “Improving the technologies of internal radiation dosimetry for personnel in radiation-hazardous industries” (code “Radiometry 25-27”) within the framework of the Federal Target Program “Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016-2020 and for the period up to 2035”, funded by the Federal Medical and Biological Agency of Russia.

Contribution. The article was prepared by one author.

Article received: 20.04.2026. Accepted for publication: 25.05.2026.