

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ САМОПОГРУЖЕНИЯ РАО В ГРАНИТЕ ЗА СЧЕТ ПРЯМОГО НАГРЕВА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

А. М. Шведов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2026 г.

*В статье рассматривается способ самопогружения РАО на основе прямого нагрева окружающей породы гамма-излучением. С помощью метода Монте-Карло проведены расчеты пространственно-энергетического распределения плотности потока гамма-излучения в граните, получена зависимость энерговыделения от расстояния для плоского источника гамма-излучения с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ . Получено численное решение системы уравнений теплопроводности в одномерном квазистационарном приближении с источником объемного тепловыделения в граните. Определены распределения температур в граните и скорость погружения в зависимости от активности  $^{60}\text{Co}$  в источнике. Получены оценки глубины погружения для источника тепловыделения на основе радионуклида  $^{60}\text{Co}$ .*

**Ключевые слова:** горная порода, метод Монте-Карло, плавление, перенос гамма-излучения, радиоактивные отходы, самопогружение, теплообмен, уравнение теплопроводности.

### Введение

При обращении с радиоактивными отходами (РАО) серьезную проблему представляет безопасное захоронение долгоживущих альфа-излучающих трансурановых элементов, период полураспада которых достигает сотни и более лет. Суммарная масса подлежащих захоронению трансурановых элементов на единицу производимой энергии составляет ~40–50 кг/ГВт·год. Учитывая дальнейший рост числа АЭС в мире, количество РАО будет увеличиваться, что делает проблему их вывода из биосферы актуальной и в будущем. В условиях развития широкомасштабной атомной энергетики при суммарной мощности 10 000 ГВт масса трансурановых элементов, подлежащих захоронению, может достигать  $4 \cdot 10^5$  кг/год.

При захоронении РАО, содержащих трансурановые элементы, в геологических формациях на относительно небольших глубинах (до ~1 км) [1], [2] возникают определенные трудности, в первую очередь связанные с обоснованием безопасности на десятки и сотни тысяч лет. В связи с этим рассматриваются альтернативные способы захоронения РАО, которые позволили бы кардинально решить проблему их удаления из биосферы. К числу таких способов можно отнести: удаление в космос на орбиту за пределы Земли, трансмутацию в энергетических реакторах на быстрых нейтронах, выжигание радиоактивных изотопов быстрыми нейтронами в специальных установках и самозахоронение в геологических формациях на больших глубинах за счет

использования собственного тепловыделения содержащихся в РАО радионуклидов.

Способ самозащоронения, при котором для погружения в окружающие породы используется выделяющаяся при радиоактивном распаде энергия, рассматривается в работах [3]–[10]. Существует также ряд патентов (например, [11]–[13]) на радиоизотопные устройства и способы погружения на основе самозащоронения. Общий принцип использования данного способа заключается в следующем. За счет тепловыделения вследствие радиоактивного распада радионуклидов происходит разогрев и плавление окружающей породы. Под нижней поверхностью устройства, используемого для погружения, образуется слой жидкого расплава. Из-за более высокой плотности устройство вытесняет жидкий расплав, в результате происходит его погружение вглубь породы.

В настоящее время данный способ находится на стадии изучения, однако он представляется перспективным, так как потенциально позволит осуществлять захоронение РАО на недоступных с помощью других известных способов глубинах (более 15 км), обеспечивая многослойный геологический барьер, отделяющий РАО от биосферы.

В работах [3]–[10], а также патентах [11]–[13] рассматриваются варианты схемы самопогружения и радиоизотопных устройств, предполагающие передачу энергии окружающей породе за счет теплопроводности. Недостатком данного теплофизического механизма является поглощение значительной доли выделяемой энергии внутри конструкции устройства. В настоящей работе рассматривается механизм передачи энергии путем прямого нагрева пород излучением, который предполагает поглощение большей части выделяемой радионуклидами энергии непосредственно в окружающей породе [14]. Это будет способствовать повышению надежности способа самозащоронения за счет снижения градиентов и уровней максимальных температур в конструкционных элементах устройства самопогружения. Возможный вариант конструкции устройства для погружения РАО описан в [14], [15] и предполагает разделение полезной нагрузки и источника тепловыделения, используемого для проплавления породы. Тепловыделяющий радионуклид может находиться в проникаемой для расплава породы решетке с шарообразными тепловыделяющими элементами диаметром около 2 см, а контейнеры с РАО прикрепляются с задней стороны по направлению движения.

Особое внимание уделяется оценкам параметров погружения и распределения температур в граните на основе численного решения системы

уравнений теплопроводности в одномерном квазистационарном приближении [16]–[18].

### Расчет пространственно-энергетического распределения плотности потока гамма-квантов и энерговыведения в граните от источника гамма-излучения с радионуклидом $^{60}\text{Co}$

С помощью пакета библиотек Geant4 [19], [20] были созданы программы для определения пространственно-энергетического распределения плотности потока гамма-излучения в окружающем материале от точечного изотропного источника с заданным энергетическим составом излучения. Моделирование переноса гамма-излучения осуществлялось методом Монте-Карло с использованием библиотеки Penelope [20] для описания процессов взаимодействия гамма-излучения со средой.

В этом исследовании рассматривалось пространственное распределение энерговыведения от точечного изотропного источника с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ . Данный радионуклид обладает высокими значениями энергии и выхода гамма-излучения на один акт распада (гамма-линии 1173 и 1332 кэВ с выходом 0,999 и 1,0 гамма-квантов на распад [21], соответственно). Период полураспада  $^{60}\text{Co}$  составляет 5,27 лет, что позволяет обеспечивать высокий уровень энерговыведения на протяжении достаточно длительного периода времени, необходимого для погружения на большие глубины. Кроме того, гамма-излучение  $^{60}\text{Co}$  обладает относительно невысокой долей самопоглощения в элементах конструкции радиоизотопного устройства [14], [15], что позволяет реализовать механизм прямого нагрева окружающей породы излучением.

Геометрия расчета в виде концентрических сфер и траектории гамма-квантов показаны на рис. 1. При моделировании переноса излучения использовались методы уменьшения дисперсии: геометрическое расщепление и русская рулетка [22].

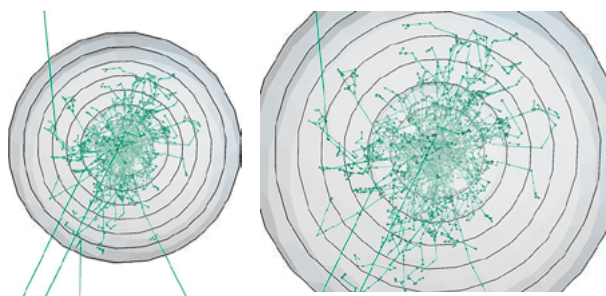


Рис. 1. Геометрия расчета переноса гамма-излучения методом Монте-Карло и траектории гамма-квантов

Полученные в результате расчетов энергетические распределения плотности потока гамма-квантов на различных расстояниях от точечного источника активностью 1 Бк показаны на рис. 2. Значения расстояний на графике выражены в терминах длин свободного пробега (дсп): 1 дсп в граните для излучения  $^{60}\text{Co}$  составляет 6,78 см. Ширина энергетической группы бралась равной 5 кэВ.

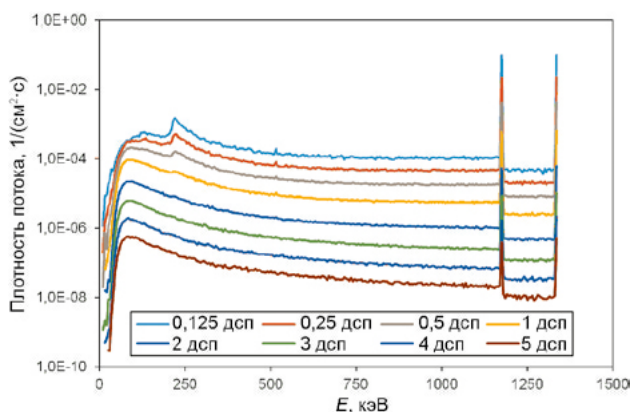


Рис. 2. Пространственно-энергетическое распределение плотности потока гамма-квантов в граните от точечного изотропного источника с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  активностью 1 Бк

Энерговыведение определялось на основе результатов расчета плотности потока с использованием следующего выражения:

$$q(r) = \int_0^{E_{max}} \varphi(r, E) \cdot E \cdot \mu_{en}(E) dE, \quad (1)$$

где  $\varphi(r, E)$  — пространственно-энергетическое распределение плотности потока гамма-излучения;  $\mu_{en}(E)$  — массовый коэффициент поглощения энергии гамма-излучения для материала гранит;  $E_{max}$  — максимальная энергия пространственно-энергетического распределения плотности потока гамма квантов (1332 кэВ).

Используя результаты расчета энерговыведения от точечного изотропного источника с последующей аппроксимацией зависимости от расстояния аналитическими функциями, было получено пространственное распределение энерговыведения для плоского источника гамма-излучения с равномерным распределением радионуклида  $^{60}\text{Co}$  по поверхности в виде:

$$Q(z) = A_s \cdot Q_\gamma \cdot \sum_{i=1}^2 a_i \cdot \exp(-b_i z), \quad (2)$$

где  $z$  — расстояние от источника,  $A_s$  — поверхностная активность источника (Бк/м<sup>2</sup>),  $Q_\gamma$  — энерговыведение на единицу активности (Вт/Бк). Константы  $a_i$  и  $b_i$  [1/м] для материала гранит составили:  $a_1 = 6,13$ ;  $b_1 = 14,67$ ;  $a_2 = 6,94$ ;  $b_2 = 84,17$ .

Полученный источник энерговыведения использовался при решении системы уравнений теплопроводности в одномерном квазистационарном приближении.

### Расчет распределения температур, скорости и глубины погружения в граните

Для определения скорости погружения и распределения температур в граните рассматривалась система уравнений теплопроводности в одномерном квазистационарном приближении [14]–[18], записанная в системе координат, движущейся вместе с плоским источником гамма-излучения:

$$\begin{cases} C(T)V \frac{dT_1(z)}{dz} = \lambda(T) \frac{d^2 T_1(z)}{dz^2} + Q(z), & z \geq 0 \\ C(T)V \frac{dT_2(z)}{dz} = \lambda(T) \frac{d^2 T_2(z)}{dz^2} + Q(z), & z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_i(z)$  — пространственное распределение температуры в  $i$ -й зоне;  $i=1$  соответствует зоне расплава породы ( $z \geq 0$ );  $i=2$  — зона с расплавляемой породой ( $z < 0$ );  $V$  — скорость погружения устройства;  $C(T)$ ,  $\lambda(T)$  — объемная теплоемкость и коэффициент теплопроводности;  $L$  — удельная теплота плавления;  $\rho$  — плотность твердого материала;  $T_{cp}$  — температура окружающей породы при  $z \rightarrow -\infty$ ;  $T_{пл} = 950$  °С — температура плавления окружающей породы. Для решения (3) использовались следующие граничные условия:  $T_1|_{z=0} = T_2|_{z=0} = T_{пл}$ ;  $T_2|_{z=-\infty} = T_{cp}$ ;

$$-\lambda(T) \frac{dT_1}{dz} \Big|_{z=0} + \lambda(T) \frac{dT_2}{dz} \Big|_{z=0} = \rho L_m V, \text{ а также условие}$$

ограниченности температурных полей.

Источник объемного тепловыведения за счет взаимодействия гамма-излучения с материалом породы задавался в виде:

$$\begin{cases} Q(z) = \sum_{i=1}^2 A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i \cdot \exp(-b_i z), & z \geq 0 \\ Q(z) = \sum_{i=1}^2 A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i \cdot \exp(b_i z), & z < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Для численного решения системы уравнений (3) с коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, зависящими от температуры, была разработана численная схема решения. На каждом шаге по  $z$  производилось определение значений производной  $dT/dz$  в конце данного отрезка путем решения соответствующей системы уравнений методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Используя значения производной на границах отрезка, путем интегрирования

определялось значение температуры, соответствующее данному отрезку. В качестве исходного условия для решения бралось равенство нулю производной при  $z \rightarrow \infty$  (условие ограниченности решения). Удовлетворение условиям на границе и равенству температуры при  $z \rightarrow -\infty$  значению  $T_{cp}$  достигалось путем варьирования значений скорости  $V$  и температуры  $T$  при  $z \rightarrow \infty$ . Начальные значения для скорости  $V$  и температуры  $T$  при  $z \rightarrow \infty$  брались на основе аналитического решения системы уравнений, рассмотренного в работах [14], [15].

Зависимости коэффициентов теплопроводности [Вт/(м·°C)] и температуропроводности [м<sup>2</sup>/с] от температуры брались в виде, представленном в работе [23]:

$$\lambda(T) = \frac{807}{(T + 350)} + 0,64, \quad (5)$$

$$\chi(T) = \frac{10^{-7}}{0,0003 \cdot (T - 227) + 0,166}. \quad (6)$$

Полученные в результате численного решения системы (3) распределения температур представлены на рис. 3. Соответствующие значения активности <sup>60</sup>Со на графике указаны в единицах Бк/м<sup>2</sup>.

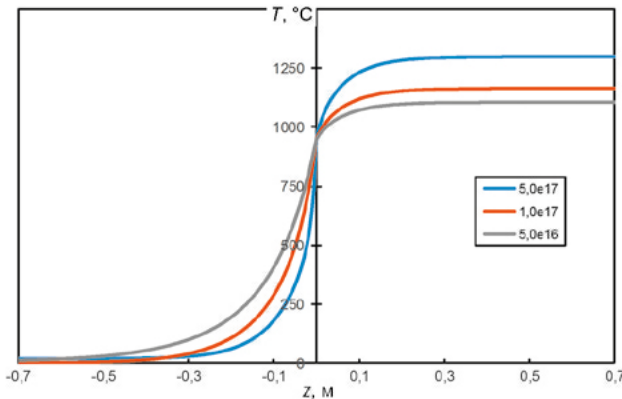


Рис. 3. Распределение температур в граните при погружении радиоизотопного устройства с различной средней поверхностной активностью <sup>60</sup>Со

Кривым на графиках, представленных на рис. 3, соответствуют значения скорости погружения  $V$ :  $5,74 \cdot 10^{-6}$ ;  $1,07 \cdot 10^{-5}$  и  $4,07 \cdot 10^{-5}$  м/с. В результате проведенного анализа было получено, что распределение температур и скорость погружения хорошо описываются аналитическим решением со средними по температуре теплофизическими константами в двух рассматриваемых областях.

Полученная в результате численных расчетов зависимость скорости погружения от поверхностной активности источника гамма-излучения с радионуклидом <sup>60</sup>Со представлена на рис. 4. Также на нем приведена упрощенная оценка скорости погружения [14], [15] в виде

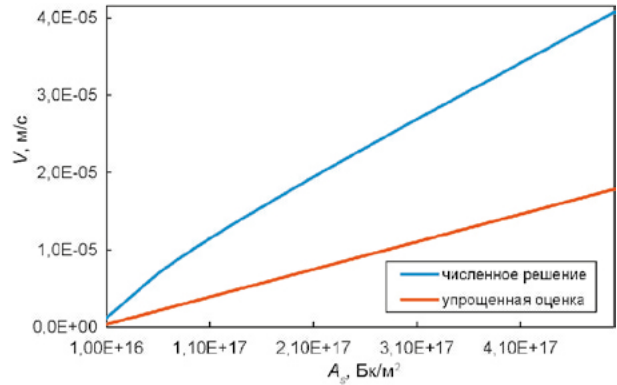


Рис. 4. Скорость погружения, полученная в результате численных расчетов и на основе упрощенной оценки, в зависимости от активности <sup>60</sup>Со

балансового соотношения, аналогичная полученной в работах [24]. Как можно видеть, упрощенное выражение дает заниженное в несколько раз значение скорости погружения.

Для определения глубины погружения использовалось трансцендентное уравнение, полученное из решения системы уравнений (3) с постоянными коэффициентами  $\lambda_i$  и  $C_i$ , соответствующими средним значениям в областях ( $z < 0$ ) и ( $z > 0$ ):

$$\sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_i}{1 + X_{1i}} \cdot \left( \frac{1}{X'_i} \right) + \sum_{i=1}^2 \frac{\Theta_i}{1 - X_{2i}} \left( \frac{1}{X_{2i}} - 1 \right) = 1 - H, \quad (7)$$

где:  $\Theta_i(z) = \frac{T_i(z) - T_{cp}}{(T_{nl} - T_{cp})}$ ;  $\Theta_{1i} = \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_1 b_i^2 \cdot (T_{nl} - T_{cp})}$ ;

$\Theta_{2i} = \sum_{i=1}^2 \frac{A_s \cdot Q_\gamma \cdot a_i}{\lambda_2 b_i^2 \cdot (T_{nl} - T_{cp})}$ ;  $X_{1i} = \frac{VC_1}{\lambda_1 b_i}$ ;  $X_{2i} = \frac{VC_2}{\lambda_2 b_i}$ ;

$Z_i = b_i z$ ;  $X'_i = \frac{VC_2}{\lambda_1 b_i}$ ;  $H = \frac{\rho \cdot L}{C_2 \cdot (T_{nl} - T_{cp})}$ .

Были выполнены численные расчеты скорости погружения с использованием выражения (7) с учетом радиоактивного распада радионуклида <sup>60</sup>Со. Для этого весь период погружения устройства разбивался на малые промежутки времени и на каждом временном отрезке  $[t_{i-1}, t_i]$  вычислялось среднее значение активности радионуклида <sup>60</sup>Со в источнике по формуле:

$$\bar{A}_{s,i} = \frac{A_s(0)}{\lambda \cdot (t_i - t_{i-1})} \{ \exp(-\lambda \cdot t_{i-1}) - \exp(-\lambda \cdot t_i) \}, \quad (8)$$

где  $A_s(0)$  — значение поверхностной активности в начальный момент времени;  $\lambda$  — постоянная распада. На основе рассчитанных с помощью (7) значений скорости погружения на всех временных отрезках, определялась глубина погружения  $H$ :

$$H = \sum_i h_i; \quad h_i = V_i \cdot (t_i - t_{i-1}). \quad (9)$$

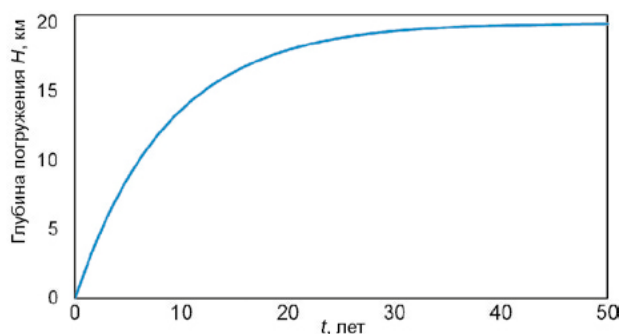


Рис. 5. Зависимость глубины погружения от времени при начальном уровне энерговыделения  $4 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>

Результаты оценки глубины погружения в зависимости от времени представлены на рис. 5 при начальной  $A_s(0) = 10^{18}$  Бк/м<sup>2</sup>.

### Заключение

В статье рассмотрено численное решение системы уравнений теплопроводности в одномерном квазистационарном приближении с учетом зависимости теплофизических свойств от температуры при реализации способа самопогружения РАО на основе прямого нагрева пород излучением. Получены распределения температур в граните, соответствующие различному уровню энерговыделения радиоизотопного устройства с радионуклидом <sup>60</sup>Со. Выполнены оценки скорости погружения РАО в граните в зависимости от активности <sup>60</sup>Со в радиоизотопном устройстве, рассматриваемом в модели в виде плоского источника гамма-излучения. Получено, что для погружения с начальной скоростью на уровне 1 км/год, необходима поверхностная плотность энерговыделения  $\sim 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>. При этом за время около 30 лет глубина погружения в граните составит 20 км.

### Литература

1. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide. Vienna, IAEA, 2009.
2. Geologic Disposal of Radioactive Waste in Perspective. Nuclear Energy Agency. Organization for economic co-operation and development. Paris, OECD, 2000. 61 p.
3. Logan S. E. Deep self-burial of radioactive wastes by rock-melting capsules // Nuclear technology. 1974. Vol. 21. P. 111.
4. Byalko A. V. AHLW Disposal in Deep Sulfur-Filled Boreholes: Start of R&D // Proceedings of Waste Management-96 Conference, February 26 — March 3, 1996, Tucson, AZ, 1996.
5. Logan S. E. Deeper geologic disposal: a new look at self-burial // Proceedings of Waste Management-99

Conference, February 28—March 4, 1999, Tucson, AZ, 1999. Pp. 10—51.

6. Ojovan M. I., Gibb F. Feasibility of very deep self-disposal for sealed radioactive sources // Proceedings of Waste Management-05 Conference, February 27 — March 3, 2005, Tucson, AZ.

7. Gibb F. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? // Waste Management. 1999. Vol. 19. Iss. 3. Pp. 207—211. DOI: 10.1016/S0956-053X(99)00050-1.

8. Ojovan M. I., Poluektov P. P., Kascheev V. A. Self-Disposal Option for Heat-Generating Waste // Proceedings of the ASME-2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. ICEM-2011, September 25—29, 2011, Reims, France.

9. Ожован М. И. Самопогружающиеся капсулы в геологической разведке и сверхглубокое захоронение радиоактивных отходов. Интернет-сайт Российского атомного сообщества, 24.08.2010. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2010/08/24/13062> (дата обращения: 21.01.2026).

10. Chen W., Hao J, Chen Z. A Study of Self-Burial of a Radioactive Waste Container by Deep Rock Melting // Science and Technology of Nuclear Installations. 2013. Vol. 2013. DOI: 10.1155/2013/184757.

11. Патент №RU 2510540 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/28 (2006.01). Способ захоронения радиоактивных отходов и тепловыделяющая капсула для его осуществления : №2012134053/07 : заявл. 09.08.12 : опубл. 27.03.14 / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, П. С. Кондратенко и др. ; патентообладатель ИБРАЭ РАН. Бюл. № 9.

12. Патент №RU 2535199 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/24 (2006.01). Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах: №2013133421/07 : заявл. 18.07.13 : опубл. 10.12.14 / Арутюнян Р. В. ; патентообладатель ИБРАЭ РАН. Бюл. № 34.

13. Патент RU 2577517 С1 Российская Федерация, МПК G21F 9/24 (2006.01). Устройство для погружения в расплавляемых геологических породах : №2015108133/07 : заявл. 10.03.15 : опубл. 20.03.16 / Арутюнян Р. В. ; патентообладатель ИБРАЭ РАН. Бюл. № 8.

14. Arutunyan R., Bolshov L., Shvedov A. A new approach to radioactive waste self-burial using high penetrating radiation // Journal of Nuclear Science and Technology. 2018. Vol. 55. No. 9. Pp. 971—978. DOI: 10.1080/00223131.2018.1461695.

15. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Шведов А. М. Самозахоронение радиоактивных отходов в геологических формациях за счет прямого нагрева пород  $\gamma$ -излучением // Атомная энергия. 2017. Т. 123. № 2. С. 88—91.

16. Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Витюков В. В. и др. Теоретический анализ и численное моделирование переноса тепла и миграции топлива в

- подстилающих грунтах и конструкциях АЭС при аварийных выбросах активной зоны : Препринт ИАЭ-4862/3. — М. : ЦНИИатоминформ, 1989.
17. Арутюнян Р. В. Теплофизические модели воздействия умеренных потоков энергии на материалы : автореф. дис... д-ра физ.-мат. наук. — М., ОИВТ РАН, 1997. 44 с.
18. Арутюнян Р. В., Большов Л. А. и др. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС. — М. : Наука, 2010. 240 с.
19. Geant4 Collaboration. Book for Application Developer. Release 10.4. Rev 1.0. 2017. 411 p.
20. Geant4 Collaboration. Physics Reference Manual. Release 10.4. Rev 1.0. 2017. 434 p.
21. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3). ICRP, 2008.
22. Murata I., Shindo R., Shiozawa S. Importance Determination Method for Geometry Splitting with Russian Roulette in Monte Carlo Calculations of Thick and Complicated Core Shielding Structure // Journal of Nuclear Science and Technology. 1995. Vol. 32. No. 10. Pp. 971—980.
23. Seipold U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks — a general law // Tectonophysics. 1998. Vol. 291. No. 1—4. Pp. 161—171. DOI: 10.1016/S0040-1951(98)00037-7.
24. Emmerman S. H., Turcotte D. L. Stokes's problem with melting // Journal of Heat Mass Transfer. 1983. Vol. 26. No 11. P. 1625—1630.

### Информация об авторе

Шведов Антон Максимович, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: sham@ibrae.ac.ru.

### Библиографическое описание статьи

Шведов А. М. Исследование параметров самопогружения РАО в граните за счет прямого нагрева гамма-излучением // Радиоактивные отходы. 2026. № 1 (34). С. 96—102. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-96-102.

## STUDY OF RW SELF-SINKING PARAMETERS IN GRANITE DRIVEN BY GAMMA-RADIATION HEATING FROM RADIOACTIVE DECAY

Shvedov A. M.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on February 5, 2026

*The paper discusses a method providing self-sinking of radioactive waste due to direct heating of the surrounding rock by gamma radiation. Based on the Monte Carlo method, it calculates spatial and energy flux density distributions in granite and presents the resulting dependence of energy release on the distance from a plane gamma radiation source with the  $^{60}\text{Co}$  radionuclide. The study provides numerical solution for a system of heat conduction equations in a one-dimensional quasi-stationary approximation with a volumetric heat source in granite. It also calculates the temperature distribution and sinking velocity in granite depending on the  $^{60}\text{Co}$  source activity driving the sinking process, as well as the sinking depth in granite for a heat source with the  $^{60}\text{Co}$  radionuclide.*

**Keywords:** rock, the Monte Carlo method, melting, gamma radiation transport, radioactive waste, self-sinking, heat transfer, heat conductivity equation.

### References

1. IAEA Safety Standards Series No. GSG-1. Classification of Radioactive Waste. General Safety Guide. Vienna, IAEA, 2009.
2. Geologic Disposal of Radioactive Waste in Perspective. Nuclear Energy Agency. Organization for economic co-operation and development. Paris, OECD, 2000. 61 p.
3. Logan S. E. Deep self-burial of radioactive wastes by rock-melting capsules. *Nuclear technology*, 1974, vol. 21, p. 111.
4. Byalko A. V. AHLW Disposal in Deep Sulfur-Filled Boreholes: Start of R&D. Proceedings of Waste Management-96 Conference, February 26 — March 3, 1996, Tucson, AZ, 1996.
5. Logan S. E. Deeper geologic disposal: a new look at self-burial. Proceedings of Waste Management-99 Conference, February 28 — March 4, 1999, Tucson, AZ, 1999. Pp. 10—51.
6. Ojovan M. I., Gibb F. Feasibility of very deep self-disposal for sealed radioactive sources. Proceedings

of Waste Management-05 Conference, February 27 – March 3, 2005, Tucson, AZ.

7. Gibb F. High-temperature, very deep, geological disposal: a safer alternative for high-level radioactive waste? *Waste Management*, 1999, vol. 19, iss. 3, pp. 207–211. DOI: 10.1016/S0956-053X(99)00050-1.

8. Ojovan M. I., Poluektov P. P., Kascheev V. A. Self-Disposal Option for Heat-Generating Waste. Proceedings of the ASME-2011 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. ICEM-2011, September 25–29, 2011, Reims, France.

9. Ojovan M. *Samopogruzhayushchiesya kapsuly v geologicheskoy razvedke i sverkhglubokoye zakhoroneniye radioaktivnykh otkhodov* [Self-sinking capsules in geological exploration and ultra-deep disposal of radioactive waste]. Website of the Russian Atomic Community, 24.08.2010. — URL: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2010/08/24/13062> (accessed on: 21.01.2026).

10. Chen W., Hao J, Chen Z. A Study of Self-Burial of a Radioactive Waste Container by Deep Rock Melting. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2013, vol. 2013. DOI: 10.1155/2013/184757.

11. Patent. RU 2510540 C1. Russian Federation, IPC G21F 9/28 (2006.01). *Sposob zakhoroneniya radioaktivnykh otkhodov i teplovdelyayushchaya kapsula dlya yego osushchestvleniya* [Radioactive waste disposal method and fuel capsule for its implementation]: No. 2012134053/07: appl. on August 9, 2012; published on March 27, 2014 / Arutyunyan R. V., Bolshov L. A., Kondratenko P. S. et al. ; applicant — IBRAE RAS. Bulletin No. 9.

12. Patent. RU 2535199 C1. Russian Federation, IPC G21F 9/24 (2006.01). *Ustroystvo dlya pogruzheniya v rasplavlyayemykh geologicheskikh porodakh* [Sinking device for molten geological rocks]: No. 2013133421/07/: appl. on July 18, 2013; published on December 10, 2014 / Arutyunyan R. V. ; applicant — IBRAE RAS. Bulletin No. 34.

13. Patent. RU 2577517 C1. Russian Federation, IPC G21F 9/24 (2006.01). *Ustroystvo dlya pogruzheniya v rasplavlyayemykh geologicheskikh porodakh* [Sinking device for molten geological rocks]: No. 2015108133/07; appl. on March 10, 2015; published on March 20, 2016 / Arutyunyan R. V. ; applicant — IBRAE RAS. Bulletin No. 8.

14. Arutyunyan R., Bolshov L., Shvedov A. A new approach to radioactive waste self-burial using high

penetrating radiation. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2018, vol. 55, no. 9, pp. 971–978. DOI: 10.1080/00223131.2018.1461695.

15. Arutyunyan R. V., Bol'shov L. A., Shvedov A. M. Samozakhroneniye radioaktivnykh otkhodov v geologicheskikh formatsiyakh za schet pryamogo nagreva porod u-izlucheniym [Radwaste Self-Disposal in Geological Formations by Direct  $\gamma$ -Ray Heating of Rock]. *Atomnaya energiya — Atomic Energy*, 2017, vol. 123, no. 2, pp. 105–110. DOI: 10.1007/s10512-017-0309-x.

16. Arutyunyan R. V., Bolshov L. A., Vityukov V. V. et al. *Teoreticheskiy analiz i chislennogo modelirovaniye perenosa tepla i migratsii topliva v podstilayushchikh gruntakh i konstruksiyakh AES pri avariynnykh vybrosakh aktivnoy zon* [Theoretical analysis and numerical modeling of heat transfer and fuel transport in underlying soils and NPP structures during accidental core releases]. Preprint IAE-4862/3. Moscow, TSNIAtominform Publ., 1989.

17. Arutyunyan R. V. *Teplofizicheskiye modeli vozdeystviya umerennykh potokov energii na materialy* [Thermophysical models of the impact produced by moderate energy flows on materials]. Dr. physical and mathematical sci. diss. Abstr. Moscow, JIHT RAS Publ., 1997.

18. Arutyunyan R. V., Bolshov L. A. et al. *Yadernoye toplivo v ob'yekte "Ukrytiye" Chernobyl'skoy AES* [Nuclear fuel in the "Shelter" encasement of the Chernobyl NPP]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 240 p.

19. Geant4 Collaboration. Book for Application Developer. Release 10.4. Rev 1.0. 2017. 411 p.

20. Geant4 Collaboration. Physics Reference Manual. Release 10.4. Rev 1.0. 2017. 434 p.

21. Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3). ICRP, 2008.

22. Murata I., Shindo R., Shiozawa S. Importance Determination Method for Geometry Splitting with Russian Roulette in Monte Carlo Calculations of Thick and Complicated Core Shielding Structure. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1995, vol. 32, no. 10, pp. 971–980.

23. Seipold U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks — a general law. *Tectonophysics*, 1998, vol. 291, no. 1–4, pp. 161–171. DOI: 10.1016/S0040-1951(98)00037-7.

24. Emmerman S. H., Turcotte D. L. Stokes's problem with melting. *Journal of Heat Mass Transfer*, 1983, vol. 26, no. 11, pp. 1625–1630.

### Information about the author

Shvedov Anton Maksimovich, Research Associate, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulkaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: sham@ibrae.ac.ru.

### Bibliographic description

Shvedov A. M. Study of RW Self-Sinking Parameters in Granite Driven by Gamma-Radiation Heating from Radioactive Decay. *Radioactive Waste*, 2026, no. 1 (34), pp. 96–102. DOI: 10.25283/2587-9707-2026-1-96-102. (In Russian).