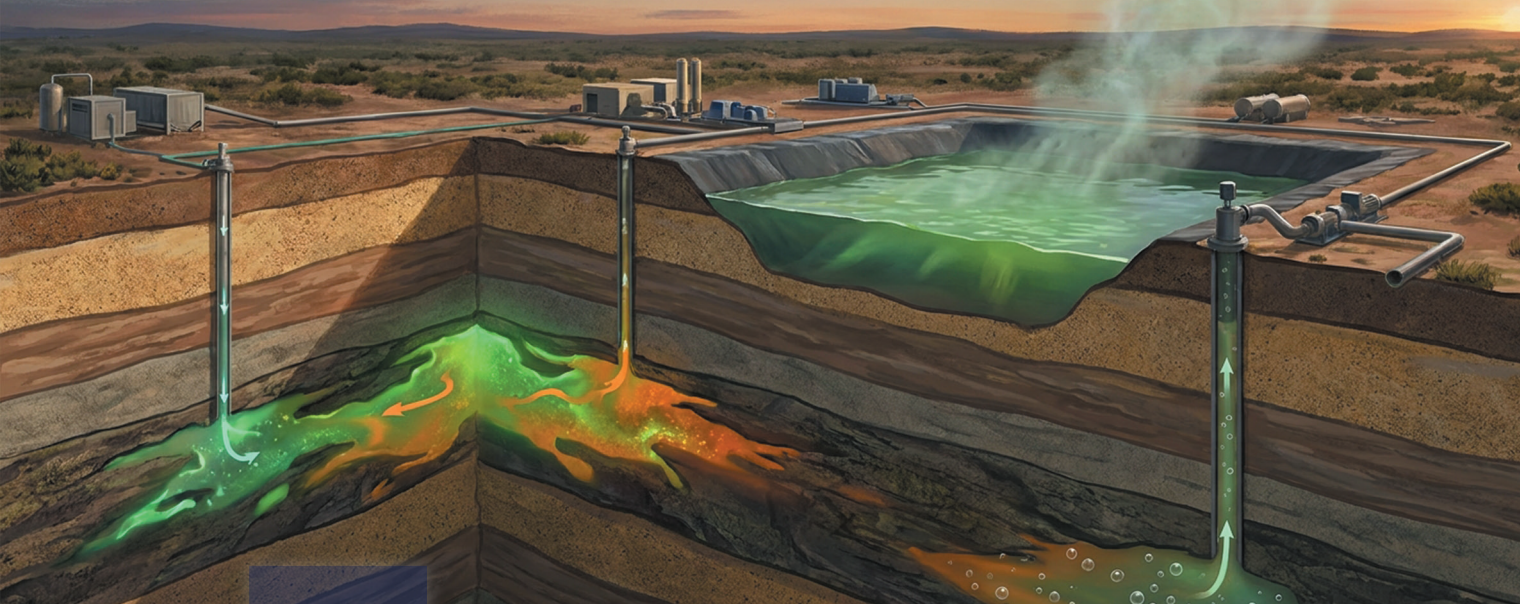




УДК: 622.349.5:546.296

DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.002

© 2026. Все права защищены.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛОЩАДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВЫБРОСА РАДОНА ПРИ ДОБЫЧЕ УРАНА МЕТОДОМ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Екидин А. А.*, канд. физ.-мат. наук (ekidin@mail.ru),
Антонов К. А.*, канд. физ.-мат. наук (antonov.k@gmail.com),
Васянович М. Е.*, канд. физ.-мат. наук (Vasyanovich_maks@mail.ru),
Пышкина М. Д.*, канд. техн. наук (mdpyshkina@gmail.com),
Понизов А. В.**, канд. техн. наук (ponizov@secnrs.ru),
Курындин А. В.**, канд. техн. наук (kuryndin@secnrs.ru),
Шаповалов А. С.** (shapovalov@secnrs.ru),
Юрин В. В.*** (VVYurin@rosatom.ru),
Вдовин А. С.*** (ASVdovin@rosatom.ru)

Статья поступила в редакцию 10 августа 2026 г.

Аннотация

Рассмотрены условия геологической среды, последовательность технологических процедур и их численные характеристики, определяющие интенсивность вымывания радона из порового пространства продуктивным раствором при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания. Для каждой последовательной операции извлечения соединений урана определены факторы, влияющие на изменение содержания ^{222}Rn в продуктивном растворе. На примере действующего участка добычи урана Далматовского месторождения, эксплуатируемого АО «Далур», показаны взаимосвязи рассматриваемых характеристик, предложено уравнение баланса, позволяющее оценить выброс радона за любой интервал времени с открытой поверхности накопителей, применяемых в качестве пескоотстойников для продуктивного раствора, являющихся неорганизованными источниками выбросов радиоактивных веществ.

По результатам оценок поступления радона в окружающую среду из указанных неорганизованных источников выбросов радиоактивных веществ подтверждена необходимость контроля и нормирования выброса радона при добыче урана на участке Далматовского месторождения методом подземного выщелачивания.

► **Ключевые слова:** атмосфера, выброс, накопитель, объемная активность, продуктивный раствор, радий, радон, скважинное выщелачивание, уран, эманация.

* Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.

** Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Россия.

*** Акционерное общество «Далур», Курганская обл., Далматовский р-н, с. Уксянское, Россия.

NATURAL AND TECHNOLOGICAL PROCESSES OF SITE RADON EMISSION SOURCES FORMATION DURING URANIUM MINING BY IN-SITU BOREHOLE LEACHING METHOD

Ekidin A. A.*, Ph. D. (Physics and Mathematics),
Antonov K. L.*, Ph. D. (Physics and Mathematics),
Vasyanovich M. E.*, Ph. D. (Physics and Mathematics),
Pyshkina M. D.*, Ph. D. (Engineering),
Ponizov A. V.**, Ph. D. (Engineering),
Kuryndin A. V.**, Ph. D. (Engineering),
Shapovalov A. S.**,
Yurin V. V.***,
Vdovin A. S.***

The article was received by the editors' crew on August 10, 2026.

Abstract

This article examines the geological environment, the sequence of technological procedures, and their numerical characteristics that determine the intensity of radon leaching from the pore space by the pregnant solution during uranium mining using the in-situ leaching method. For each sequential operation of uranium compound extraction, factors influencing changes in the ^{222}Rn content in the pregnant solution are determined. Using the example of an operating uranium mining site at the Dalmatovskoye deposit, operated by JSC «Dalur» the relationships between these characteristics are demonstrated, and a balance equation is proposed for estimating radon emissions over any time interval from the open surface of storage pits used as sand settling basins for the pregnant solution, which are diffuse sources of radioactive substance emissions.

Based on the assessments carried out in the study the need to monitor and regulate radon emissions during uranium mining at the Dalmatovskoye deposit using the in-situ leaching method was confirmed.

► **Keywords:** atmosphere, emission, storage facility, volumetric activity, pregnant solution, radium, radon, borehole leaching, uranium, emanation.

* Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia.

** Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russia.

*** Joint-Stock Company "Dalur", Uksyanskoye village, Dalmatovskiy district, Kurgan region, Russia.

Введение

Добыча природного урана – одна из важнейших составляющих обеспечения энергетической безопасности и обороноспособности Российской Федерации. С начала 2000-х гг. в Курганской области поэтапно вводились в эксплуатацию месторождения Зауральского уранорудного района: Далматовское, Хохловское, Добровольное. Запасы урана в этих месторождениях являются сырьевой базой АО «Далур» [1, 2]. Разрабатываемые АО «Далур» месторождения – экзогенные, песчанникового типа. Урановые оруденения в форме лент, протяженностью несколько км и шириной от 50 до 600 м, залегают в аллювиальных отложениях палеодолины верхне-юрского возраста. Рудные минералы – коффинит и настуран. Руды гидрослюдисто-каолинит-кварцевые с содержанием кварца 70–90 % бескарбонатные. Рудовмещающая толща перекрыта более чем на 100 м толщей глинистых отложений верхнеюрского возраста. В осадочном чехле над рудовмещающим водоносным горизонтом присутствуют четыре надрудных водоносных горизонта, разделенных водоупорными породами. Гидравлическая связь в пределах рудных полей между водоносными горизонтами отсутствует. Коэффициент радиоактивного равновесия руд принят 1,0 [2].

Согласно геологической классификации руды разрабатываемых АО «Далур» месторождений по содержанию урана (0,035–0,50 %) относятся к бедным. Извлечение урана из подобных месторождений обосновано проводить методом скважинного подземного выщелачивания (СПВ). Для данного метода добычи содержание урана не играет существенной роли, а обязательным условием является хорошая проницаемость среды, содержащей урановую минерализацию [3]. Метод СПВ широко применяется разными странами, в мировом производстве урана его доля увеличилась с 20 % в 2005 г. до 56 % в 2020 г. [4]. В отличие от открытого (карьерного) или шахтного способа добычи, при СПВ не происходит транспортирование руды, ее дробление, измельчение, обогащение и т. п. Поэтому для ввода в эксплуатацию и освоения месторождений урана требуется возводить в 2–4 раза меньше объектов промышленного и гражданского назначения, что приводит к повышению производительности труда и снижению в 3–6 раз себестоимости получения конечной продукции в сравнении с другими способами добычи [1, 3].

Изотопный состав природного урана любого месторождения складывается из трех изотопов: ^{238}U

(массовая доля – 0,9927), ^{235}U (0,0072), ^{234}U (0,000055). ^{234}U образуется в радиоактивной цепочке ^{238}U . В этой же цепочке образуется ^{226}Ra , являющийся материнским нуклидом для естественного радиоактивного инертного газа ^{222}Rn , имеющего период полураспада 3,82 сут [5]. Также в радиоактивной цепочке ^{235}U образуется радиоактивный инертный газ ^{219}Rn , но его короткий период полураспада, менее 4 с, препятствует его выходу из твердых материалов и формированию условий для облучения человека [6].

В любых горных породах, не затронутых процессами выщелачивания, активность ^{226}Ra будет соответствовать активности ^{238}U , а на 1 т металлического урана приходится 0,34 г радия [7]. Каждый грамм ^{238}U в горной породе создает активность 12,3 кБк. В условиях векового радиоактивного равновесия в горных породах на каждый грамм ^{238}U будет приходиться 12,3 кБк ^{226}Ra и столько же ^{222}Rn .

Применение серной кислоты для извлечения урана методом СПВ приводит к образованию в руде практически нерастворимых соединений радия [8]. Извлечение из руды природного урана продуктивным раствором не снижает активность ^{226}Ra в разрабатываемых горных породах и не уменьшает интенсивность образования ^{222}Rn . Таким образом, любой разрабатываемый методом СПВ участок становится источником образования ^{222}Rn в рудном теле с постоянной интенсивностью.

Растворение радона в продуктивном растворе приводит к его перемещению из рудного тела на дневную поверхность.

В рамках представленной работы рассмотрены процессы, влияющие на содержание радона в продуктивном растворе при:

- прохождении по поровому пространству отдельно взятого участка добычи урана;
- транспортировании раствора до открытого накопителя;
- переливе из магистрального трубопровода и нахождении в накопителе.

На отдельных участках технологической цепочки обращения с продуктивным раствором, таких как открытые накопители продуктивного раствора, радон будет поступать в атмосферный воздух [9]. Для промышленной добычи урана МАГАТЭ рекомендует рассматривать выбросы ^{222}Rn в качестве важного фактора радиационного воздействия на работников и окружающую среду, не конкретизируя источники выбросов [9].

При отсутствии возможности определения прямыми измерениями активности выброса радона

с поверхности накопителей актуальным является разработка и обоснование расчетного метода. С целью оценки поступления радона в атмосферный воздух над поверхностью накопителя продуктивных растворов определены контролируемые геотехнологические параметры добычи урана методом СПВ, однозначно связанные с интенсивностью выброса радона. Непрерывный контроль технологического процесса СПВ урана обеспечивает непрерывность контроля поступления радона в атмосферу.

Факторы и процессы, определяющие содержание радона в продуктивном растворе при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания

Для селективного извлечения урана выщелачивающими растворами из руды на месте ее залегания в рудное тело через систему закачных скважин подается раствор с 1–2%-ным содержанием серной кислоты, который вскрывает урановые минералы, просачиваясь через рудный пласт [10]. Вывод продуктивных растворов, обогащенных ураном, на поверхность производится через систему откачных скважин [11]. Из откачных скважин поднятый продуктивный раствор по герметичным магистральным трубопроводам подается в открытые накопители для удаления минеральных частиц (песка), снижающих эффективность извлечения урана. Из накопителей раствор далее поступает на технологические операции по извлечению урана. В результате ионообменных процессов переработки растворов на технологической установке получается конечная продукция – концентрат природного урана (полиураната аммония) [2]. В результате применения метода СПВ извлекается до 80 % от запаса природного урана разрабатываемого участка [11].

Радон, являясь инертным газом, при эманировании из руды стремится заполнить поровое пространство горных пород, через которое происходит просачивание продуктивного раствора. Активность радона в поровом пространстве горной породы зависит от содержания урана на момент начала разработки месторождения, доли радона, поступающей из руды в поровое пространство, а также от пористости и объема порового пространства горных пород. Обогащение продуктивного раствора радоном при просачивании по поровому пространству месторождения зависит от постоянной вымывания, прямо пропорциональной скорости перемещения раствора в рудном теле и обратно пропорциональной объему порового пространства.

При достаточной длительности технологического процесса наступает динамическое равновесие между эманированием радона из руды в поровое пространство, его распадом и вымыванием раствором. Растворенный в продуктивном растворе ^{222}Rn транспортируется жидкостью по рудному телу к откачным скважинам. На этом этапе в растворе происходят два конкурирующих процесса [12]:

- снижение активности радона за счет естественного распада;
- увеличение содержания радона за счет его вымывания из порового пространства.

На этапе подъема откачными насосами продуктивного раствора на дневную поверхность происходит снижение активности радона в растворе за счет естественного распада. Прямого поступления радона из откачных скважин в атмосферный воздух не происходит, так как горловины откачных скважин герметично связаны с магистральными трубопроводами. При транспортировке раствора по магистральным трубопроводам от горловин откачных скважин до перелива в чаши накопителей продуктивного раствора происходит снижение активности радона за счет естественного распада. В момент перелива радон поступает в атмосферный воздух за счет аэрации, в результате которого практически весь радон из раствора способен попасть в атмосферу [13]. С поверхности накопителей происходит выброс радона за счет процесса эксхалляции [12]. Влияние естественного распада на изменение активности радона в растворе накопителей пренебрежимо мало, поскольку время его нахождения в накопителе много меньше периода полураспада. В технологическом процессе извлечения урана из продуктивного раствора на ионообменных смолах происходит также практически полное сорбционное извлечение радона [14, 15]. Незначительная часть радона с ионообменных колонн поступает в организованные источники выброса.

Порядок оценки выброса ^{222}Rn из накопителей продуктивных растворов

Оценка выброса ^{222}Rn из накопителей продуктивных растворов (НПР) опирается на сведения о технологических процессах СПВ, физических закономерностях и свойствах среды. За любой выбранный интервал времени (t) добычи урана весь ^{222}Rn , поднятый на поверхность и перемещенный в накопитель продуктивным раствором (W_g^t , Бк за интервал t), будет распространяться по двум основным направлениям:

1) поступать в атмосферный воздух (W_{ar}^t , Бк за интервал t);

2) переноситься продуктивным раствором (W_{pr}^t , Бк за интервал t) далее по технологической цепочке извлечения продукта из раствора.

Такое распределение радона описывается уравнением баланса:

$$W_g^t = W_{ar}^t + W_{pr}^t, \text{ Бк за интервал } t, \quad (1)$$

где W_g^t – интенсивность поднятия радона продуктивным раствором на дневную поверхность за выбранный период времени работы откачных насосов, Бк за интервал t ;

W_{ar}^t – интенсивность выброса радона в атмосферный воздух за выбранный период времени работы откачных насосов, Бк за интервал t ;

W_{pr}^t – интенсивность поступления радона с раствором далее в технологический процесс извлечения продукта за выбранный период времени работы откачных насосов, Бк за интервал t .

При эксплуатации любого открытого НПР уравнение баланса (1) позволяет выполнить оценку выброса радона в атмосферный воздух за любой выбранный интервал времени t (W_{ar}^t):

$$W_{ar}^t = W_g^t - W_{pr}^t, \text{ Бк за интервал } t. \quad (2)$$

Выброс ^{222}Rn в атмосферный воздух из накопителя учитывает как аэрацию при переливе продуктивного раствора из магистрального трубопровода в накопитель, так и эксхалляцию радона с открытой поверхности накопителя. Выполнять оценку каждого пути поступления радона в воздух нецелесообразно, поскольку суммарный выброс за любой интервал времени t будет определяться выражением (2).

Оценка выброса ^{222}Rn с поверхности накопителя (W_{ar}^t) по выражению (2) построена на возможности расчета уменьшаемого (W_g^t) и вычитаемого (W_{pr}^t). Расчет W_g^t построен с учетом последовательности этапов добычи и физических процессов на каждом этапе:

- образование ^{222}Rn в рудном теле при распаде ^{226}Ra , активность которого, согласно условиям векового радиоактивного равновесия, до начала разработки месторождения равна активности ^{238}U ;

- эманация ^{222}Rn из твердого материала руды в поровое пространство месторождения и формирование равновесной активности радона в поровом пространстве рудного тела до начала извлечения урана;

- вымывание ^{222}Rn из порового пространства продуктивным раствором при его просачивании с целью извлечения добываемого ^{238}U и установление динамического равновесия объемной активности радона в поровом пространстве как результат двух противоположных процессов – поступления радона в поровое пространство из урановой руды и вымывания радона из порового пространства продуктивным раствором;

- перенос ^{222}Rn продуктивным раствором по трубам откачных скважин и герметичным магистральным трубопроводам до НПР с открытой поверхностью, в ходе которого происходит частичное снижение активности ^{222}Rn в растворе за счет естественного радиоактивного распада радона;

- выброс ^{222}Rn в атмосферу с открытой поверхности НПР.

Для оценки интенсивности образования ^{222}Rn в рудном теле при распаде ^{226}Ra необходимо использовать справочные данные об удельной активности ^{238}U ($YA_{U_{238}}$) и данные о запасах природного урана (M_{U_0} , т), которые позволяют определить активность ^{238}U ($A_{U_{238}}$), ^{226}Ra (A_{Ra}) и ^{222}Rn (A_{Rn}) в месторождении до начала разработки в условиях векового равновесия:

$$A_{U_{238}} = 0,9927 \cdot M_{U_0} \cdot YA_{U_{238}} \cdot 10^6, \text{ Бк}; \quad (3)$$

$$A_{Rn} = A_{Ra} = A_{U_{238}}, \text{ Бк}; \quad (4)$$

$$A_{Rn} = 0,9927 \cdot M_{U_0} \cdot YA_{U_{238}} \cdot 10^6, \text{ Бк}, \quad (5)$$

где $A_{U_{238}}$ – суммарная активность ^{238}U в разрабатываемом участке месторождения до начала выщелачивания, Бк;

0,9927 – массовая доля ^{238}U в природном уране;

M_{U_0} – запасы природного урана разрабатываемого участка, направляющего продуктивные растворы в конкретный НПР, на момент начала добычи, т;

$YA_{U_{238}}$ – удельная активность ^{238}U , 12 300 Бк/г;

A_{Rn} – суммарная активность ^{222}Rn в руде месторождения до разработки участка, Бк;

A_{Ra} – суммарная активность ^{226}Ra в руде месторождения, Бк;

10^6 – число грамм в одной тонне, г/т.

Эманация ^{222}Rn из руды в поровое пространство месторождения и формирование постоянной активности радона (A_{Rn}^0) в поровом пространстве в условиях радиоактивного векового равновесия определяется активностью радона в руде A_{Rn} и значением коэффициента эманации:

$$A_{Rn}^0 = A_{Rn} \cdot K_{эм}, \text{ Бк}, \quad (6)$$

где A_{Rn}^0 – суммарная активность радона в поровом пространстве руды месторождения до разработки, Бк;

A_{Rn} – суммарная активность радона в руде месторождения до разработки, Бк;

A_{Ra} – суммарная активность радия в руде месторождения, Бк;

$K_{эм}$ – коэффициент эманации.

Движение продуктивного раствора по поровому пространству месторождения приводит к снижению активности A_{Rn}^0 . Вновь установленная в динамическом равновесии активность радона (A_{Rn}^{dyn}) в суммарном объеме порового пространства руды разрабатываемого месторождения определяется постоянными распада ^{222}Rn (λ_{Rn}) и вымывания (λ_{wash}) продуктивным раствором из порового пространства:

$$A_{Rn}^{dyn} = A_{Rn}^0 \cdot \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn} + \lambda_{wash}}, \text{ Бк}, \quad (7)$$

где A_{Rn}^{dyn} – установившаяся динамическая активность ^{222}Rn в поровом пространстве разрабатываемого участка, Бк;

A_{Rn}^0 – суммарная активность радона в поровом пространстве руды месторождения до разработки участка, Бк;

λ_{wash} – постоянная вымывания ^{222}Rn из порового пространства продуктивным раствором, ч^{-1} ;

λ_{Rn} – постоянная распада радона, $7,55 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$.

Постоянная вымывания (λ_{wash}) прямо пропорциональна суммарной производительности насосов откачных скважин (Q) и обратно пропорциональна суммарному объему порового пространства в руде месторождения (V_{pores}):

$$\lambda_{wash} = \frac{Q}{V_{pores}}, \text{ ч}^{-1}, \quad (8)$$

где λ_{wash} – постоянная вымывания ^{222}Rn продуктивным раствором, ч^{-1} ;

Q – суммарная производительность насосов продуктивного раствора, $\text{м}^3/\text{ч}$;

V_{pores} – суммарный объем порового пространства в руде разрабатываемого участка, м^3 .

Суммарная производительность насосов продуктивного раствора (Q) в выражении (8) определяется количеством откачных скважин, направляющих раствор в конкретный накопитель (N), средней производительностью насосов откачных скважин (q), средним значением времени работы рассматриваемых насосов в год (τ):

$$Q = \frac{N \cdot q \cdot \tau}{100 \%}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (9)$$

где Q – суммарная производительность насосов продуктивного раствора откачных скважин, направляющих раствор в конкретный накопитель, $\text{м}^3/\text{ч}$;

N – количество откачных скважин, направляющих раствор в конкретный накопитель продуктивного раствора, шт.;

q – средняя производительность насосов откачных скважин, $\text{м}^3/\text{ч}$;

τ – среднее значение времени работы рассматриваемых насосов в год, %.

Для оценки объема порового пространства руды (V_{pores}), содержащего ^{222}Rn , необходимо использовать геотехнологические данные о суммарной массе горной породы (M_{total}), общей пористости (n) и плотности горных пород (ρ), которые позволяют последовательно определить массу (M_{total}) и объем (V_{total}) горной породы разрабатываемого участка месторождения:

$$V_{total} = \frac{M_{total}}{\rho}, \text{ м}^3; \quad (10)$$

$$V_{pores} = \frac{V_{total} \cdot n}{100\%}, \text{ м}^3, \quad (11)$$

где M_{total} – суммарная масса горной породы разрабатываемого участка, т;

V_{total} – суммарный объем горной породы разрабатываемого участка, м^3 ;

ρ – объемная масса отработываемого горнорудного тела, $\text{т}/\text{м}^3$;

V_{pores} – суммарный объем пор в горной породе разрабатываемого участка, м^3 ;

n – пористость горных пород разрабатываемого участка, %.

Значения суммарного объема пор (V_{pores}) и активности радона в динамическом равновесии (A_{Rn}^{dyn}) позволяют оценить объемную активность радона в поровом пространстве месторождения (OA_{Rn}^{dyn}) в условиях динамического равновесия:

$$OA_{Rn}^{dyn} = \frac{A_{Rn}^{dyn}}{V_{pores}}, \text{ Бк}/\text{м}^3, \quad (12)$$

где OA_{Rn}^{dyn} – объемная активность радона в поровом пространстве месторождения в условиях динамического равновесия, $\text{Бк}/\text{м}^3$;

A_{Rn}^{dyn} – активность радона в поровом пространстве в динамическом равновесии, Бк;

V_{pores} – суммарный объем пор в разрабатываемых блоках месторождения, м^3 .

В процессе просачивания продуктивного раствора по поровому пространству происходит вымывание ^{222}Rn раствором. За счет вымывания объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе ($OA_{p.s.}$) становится равной объемной активности радона

в поровом пространстве месторождения в условиях динамического равновесия (OA_{Rn}^{dyn}):

$$OA_{p.s.} = OA_{Rn}^{dyn}, \text{ Бк/м}^3, \quad (13)$$

где $OA_{p.s.}$ – объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе в условиях сформированного динамического равновесия, Бк/м³;

OA_{Rn}^{dyn} – объемная активность радона в поровом пространстве месторождения в условиях динамического равновесия, Бк/м³.

Процесс обогащения продуктивного раствора радоном завершается при его поступлении из рудного тела в трубы откачных скважин. Из труб откачных скважин раствор по герметичным наружным магистральным трубопроводам перемещается в НПП для очистки от песка. Рассмотренное перемещение раствора по трубам различного диаметра приводит к снижению активности ^{222}Rn в растворе за счет естественного радиоактивного распада радона. Для оценки потерь активности радона следует оценить его распад отдельно на трех этапах перемещения продуктивного раствора¹ за время прохождения:

- в нижней части труб откачных скважин (t_s) длиной (l_s) и диаметром (d_s);
- в верхней части труб откачных скважин (t_b) длиной (l_b) и диаметром (d_b);
- по наружным магистральным трубопроводам до накопителя (t_m).

Общее время перемещения продуктивного раствора от рудного тела до накопителя (t_g), в течение которого происходит только снижение активности радона, определяется простой суммой затрат времени последовательного прохождения раствора через нижнюю часть труб откачных скважин (t_s), затем верхней части труб откачных скважин (t_b) и на заключительном этапе по герметичному наружному магистральному трубопроводу (t_m) до накопителя:

$$t_g = t_s + t_b + t_m, \text{ ч}, \quad (14)$$

где t_g – суммарное время прохождения продуктивного раствора от рудного тела до НПП, при котором происходит снижение активности радона за счет естественного радиоактивного распада, ч;

¹ Примечание:

- нижняя часть каждой откачной скважины длиной l_s обсажена трубами с внутренним диаметром d_s ;
- верхняя часть каждой откачной скважины длиной l_b обсажена трубами с внутренним диаметром d_b ;
- значение d_b всегда больше значения d_s .

t_s – время прохождения раствора в нижней части труб откачных скважин, ч;

t_b – время прохождения раствора в верхней части труб откачных скважин, ч;

t_m – время прохождения раствора по герметичному наружному магистральному трубопроводу от устья (оголовка) откачной скважины до слива в НПП, ч.

Время перемещения продуктивного раствора в нижней части труб откачных скважин (t_s , ч) и далее в верхней части труб откачных скважин (t_b) будет определяться выражениями:

$$t_s = \frac{l_s \cdot d_s^2}{4 \cdot q} \cdot \pi \cdot 10^{-6}, \text{ ч}, \quad (15)$$

$$t_b = \frac{l_b \cdot d_b^2}{4 \cdot q} \cdot \pi \cdot 10^{-6}, \text{ ч}, \quad (16)$$

где t_s – время прохождения раствора в нижней части труб откачных скважин, ч;

l_s – длина нижней части труб откачных скважин, м;

d_s – диаметр нижней части труб откачных скважин, мм;

t_b – время прохождения раствора в верхней части труб откачных скважин, ч;

l_b – длина верхней части труб откачных скважин, м;

d_b – диаметр верхней части труб откачных скважин, мм;

q – средняя производительность одного насоса продуктивного раствора откачной скважины, м³/ч;

10^{-6} – коэффициент пропорциональности, мм²/м².

Установленное по выражению (14) суммарное время перемещения продуктивного раствора от рудного тела до накопителя (t_g) и постоянная распада радона (λ_{Rn}) позволяют определить значение объемной активности радона в продуктивном растворе, переливаемом из магистрального трубопровода в накопитель, с учетом ее снижения за счет естественного радиоактивного распада при перемещении:

$$OA_g = OA_{p.s.} \cdot e^{(-\lambda_{Rn} \cdot t_g)}, \text{ Бк/м}^3, \quad (17)$$

где OA_g – объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе, поднятом на дневную поверхность, Бк/м³;

$OA_{p.s.}$ – объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе в условиях сформированного динамического равновесия, Бк/м³;

λ_{Rn} – постоянная распада радона, $7,55 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$;

t_g – суммарное время прохождения раствора от рудного тела до НПР, при котором происходит снижение активности радона за счет естественного радиоактивного распада, ч.

В итоге уменьшаемое (W_g^t) – интенсивность непрерывного поднятия продуктивным раствором на дневную поверхность радона за выбранный период времени работы откачных насосов t – рассчитывается по формуле:

$$W_g^t = OA_g \cdot Q \cdot t = W_g^h \cdot t, \text{ Бк за интервал } t, \quad (18)$$

где W_g^t – интенсивность поднятия радона раствором на дневную поверхность с учетом потерь на радиоактивный распад за выбранный период времени t работы насосов, Бк за интервал времени t ;

OA_g – объемная активность ^{222}Rn в растворе, поднятом на дневную поверхность, Бк/м³;

Q – суммарная производительность насосов продуктивного раствора откачных скважин, направляющих продуктивный раствор в конкретный НПР, м³/ч;

t – выбранный период времени для оценки вымывания, ч.

Для расчета вычитаемого (W_{pr}^t , Бк за интервал t) необходимы исходные данные о среднегодовом содержании радона в продуктивном растворе накопителя (OA_{pr}), полученные в рамках системы производственного контроля:

$$W_{pr}^t = OA_{pr} \cdot Q \cdot t, \text{ Бк за интервал } t, \quad (19)$$

где W_{pr}^t – интенсивность поступления радона из НПР в технологический процесс извлечения продукта за интервал времени t , Бк за интервал t (ч);

OA_{pr} – по данным производственного контроля объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе, поступающем из НПР в технологический процесс получения продукта, Бк/м³;

Q – суммарная производительность насосов продуктивного раствора откачных скважин, направляющих продуктивный раствор в конкретный НПР, м³/ч;

t – выбранный период времени для оценки вымывания, ч.

Окончательный расчет искомой разницы (W_{ar}^t) в выражении (2), с учетом выражений (18) и (19), производится следующим образом:

$$W_{ar}^t = (OA_g \cdot Q \cdot t) - (OA_{pr} \cdot Q \cdot t), \text{ Бк за интервал } t; \quad (20)$$

или

$$W_{ar}^t = W_g^t - W_{pr}^t = (OA_g - OA_{pr}) \cdot Q \cdot t, \text{ Бк за интервал } t, \quad (21)$$

где W_{ar}^t – интенсивность выброса радона в атмосферный воздух за выбранный период времени работы откачных насосов, Бк за интервал t ;

OA_g – объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе, поднятом на дневную поверхность, Бк/м³;

OA_{pr} – по данным производственного контроля среднегодовая объемная активность ^{222}Rn в продуктивном растворе, поступающем из накопителя в технологический процесс получения продукта, Бк/м³;

Q – суммарная производительность насосов продуктивного раствора откачных скважин, направляющих раствор в конкретный накопитель, м³/ч.

Условия формирования выброса ^{222}Rn из накопителя продуктивных растворов Западной залежи Далматовского месторождения

На разрабатываемом участке Западной залежи Далматовского месторождения эксплуатируется накопитель продуктивных растворов объемом 470 м³ и общей площадью 414 м². Для оценки выброса радона с поверхности накопителя используется ряд консервативных предположений, справочные, геотехнологические и физические данные, параметры непрерывного контроля технологического процесса добычи урана.

Для подтверждения натурными исследованиями объемной активности ^{222}Rn в продуктивном растворе, поднятом на дневную поверхность, необходимо проведение измерений такой активности в растворе каждой откачной скважины, направляющей продуктивный раствор в накопитель, что является трудоемкой задачей. Однако для оценки выбросов ^{222}Rn сверху может быть применен метод расчета объемной активности ^{222}Rn в продуктивном растворе, основанный на ряде консервативных предположений.

Консервативные предположения относятся к распределению ^{226}Ra в рудном теле до процесса выщелачивания, его активности в рудном теле в процессе выщелачивания и значению коэффициента эманации ($K_{эм}$) ^{222}Rn из урановых руд в поровое пространство рудного тела. ^{226}Ra равномерно распределен в рудном теле, что формирует условие для равномерного распределения радона в пределах разрабатываемого месторождения. В процессе выщелачивания урана сернокислым раствором радий не переходит в продуктивный раствор и его активность в рудном теле не снижается за период добычи урана [11], что определяет непрерывность

образования радона в рудном теле с постоянной интенсивностью. Объем продуктивного раствора в объеме горнорудной массы равен суммарному объему пор в рудном теле разрабатываемого участка. Экспериментальные значения $K_{эм}$ для различных твердых материалов лежат в интервале от 0,1 до 85 % [15]. Исследования радоновыделения из горных пород показали значения в диапазоне от 1,2 до 17,5 % [8]. В настоящей работе консервативно используется значение $K_{эм} = 18$ %, что не противоречит результатам [16].

К доступным справочным (физическим) данным, применимым для всех разрабатываемых АО «Далур» участков, относятся:

- постоянная распада ^{222}Rn , равная $0,181 \text{ сут}^{-1}$, что соответствует $7,55 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}$ или $2,10 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$, (λ_{Rn});
- массовая доля ^{238}U в природном уране, равная 0,9927 [17]²;
- удельная активность ^{238}U , равная $12\,300 \text{ Бк/г}$ ($\text{UA}_{\text{U}238}$).

В число доступных геотехнологических данных, характеризующих конкретные условия формирования выброса из рассматриваемого накопителя продуктивных растворов, входят:

- вовлеченные в отработку запасы горнорудной массы $M_{\text{total}} = 7\,221,7 \text{ тыс. т}$;
- запасы природного урана разрабатываемого участка, направляющего продуктивные растворы в накопитель до начала добычи $M_{\text{Uo}} = 1\,975,1 \text{ т}$;
- средняя объемная масса отрабатываемого горнорудного тела $\rho = 1,65 \text{ т/м}^3$;
- среднее значение общей пористости горных пород участка $n = 36$ %;
- количество откачных скважин, направляющих продуктивный раствор в накопитель $N = 91$ шт.;
- диаметр нижней части труб откачных скважин $d_s = 74 \text{ мм}$;
- средняя протяженность нижней части труб откачных скважин $l_s = 122,6 \text{ м}$;
- диаметр верхней части труб откачных скважин $d_b = 128 \text{ мм}$;
- средняя протяженность верхней части труб откачных скважин $l_b = 273,5 \text{ м}$.

В перечень доступных результатов постоянного и непрерывного контроля технологического процесса добычи урана, являющихся исходными данными для расчета выброса ^{222}Rn из рассматриваемого НПП, включены:

- средняя производительность насоса продуктивного раствора откачной скважины $q = 4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- среднее значение (доля) времени работы насосов в год $\tau = 97,5$ %;
- среднее время движения продуктивного раствора от откачных скважин до накопителя $t_m = 2,5 \text{ ч}$;
- среднегодовое содержание радона в продуктивном растворе накопителя $OA_{pr} = 319\,700 \text{ Бк/м}^3$.

Все требуемые для расчета исходные данные формируются специалистами АО «Далур» в рамках управления технологическими процессами по добыче урана методом СПВ.

Выброс ^{222}Rn из накопителя продуктивных растворов Западной залежи Далматовского месторождения

Результат расчета по выражению (5) показывает, что до начала добычи урана методом СПВ в руде Западной залежи Далматовского месторождения запас ^{222}Rn (A_{Rn}) составлял $2,43 \cdot 10^{13} \text{ Бк}$. Из установленного запаса радона только 18 % поступает в поровое пространство горной массы (A_{Rn}^0), а именно $4,37 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$.

Для выполнения последующих расчетов необходимо определить суммарную производительность насосов продуктивного раствора откачных скважин, направляющих раствор в рассматриваемый накопитель (Q), по формуле (9). Из порового пространства участка добычи Западной залежи каждый час 91 откачным насосом со средней производительностью $4,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ с учетом реального времени работы (97,5 % календарного года) откачивают $399,3 \text{ м}^3$ продуктивного раствора, содержащего радон.

С целью определения суммарного объема пор и запаса радона в порых выполнен расчет суммарного объема горной породы Западной залежи (V_{total}) по формуле (10) – $4,38 \cdot 10^6 \text{ м}^3$. Это значение и известное значение пористости позволяют по формуле (11) определить суммарный объем пор в горной породе разрабатываемого участка (V_{pores}), в который поступает радон при эманации из урановой руды – $1,58 \cdot 10^5 \text{ м}^3$.

Для оценки активности радона в горной породе при непрерывном его вымывании продуктивным раствором выполнен расчет постоянной вымывания ^{222}Rn по формуле (8): $\lambda_{\text{wash}} = 2,53 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1}$. Тогда установившаяся динамическая активность ^{222}Rn в поровом пространстве разрабатываемого участка Западной залежи ($A_{\text{Rn}}^{\text{dyn}}$) по формуле (7) составляет $4,23 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$ (снижение на 3,2 % от запаса до начала добычи). Объем порового пространства

² Природный уран, добываемый на любом месторождении любым способом, состоит из трех изотопов: ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U . Массовая доля ^{234}U в природном уране составляет 0,0054 %; ^{235}U – 0,7171 %; ^{238}U – 99,2746 % [17].

($V_{\text{pores}} = 1,58 \cdot 10^5 \text{ м}^3$) заполнен продуктивным раствором, в котором содержание радона ($OA_{\text{Rn}}^{\text{dyn}}$) составляет $2,69 \cdot 10^6 \text{ Бк/м}^3$.

Время перемещения раствора от рудного тела (основания откачных скважин) до поверхности и далее по магистральным трубопроводам до накопителя ($t_g = 3,4 \text{ ч}$) складывается из времени перемещения раствора в нижней ($t_s = 0,117 \text{ ч}$) и верхней частях труб откачных скважин ($t_b = 0,782 \text{ ч}$) и движения по магистральному трубопроводу до накопителя ($t_m = 2,5 \text{ ч}$). За время перемещения, согласно выражению (17), объемная активность радона в продуктивном растворе снижается на 2,5 % и составляет $OA_{\text{p.s.}} = 2,62 \cdot 10^6 \text{ Бк/м}^3$.

Выполненные по выражению (18) расчеты интенсивности непрерывного поднятия радона продуктивным раствором (W_g^h , Бк/ч) показывают, что за каждый час на дневную поверхность из разрабатываемого участка Западной залежи с раствором поступает $1,04 \cdot 10^9 \text{ Бк}$ радона. При такой часовой интенсивности с раствором поднимается:

- за календарный год $9,15 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$ радона;
- ежесекундно $2,90 \cdot 10^5 \text{ Бк}$ радона.

Опираясь на данные производственного контроля о среднегодовом содержании радона в растворе исследуемого накопителя ($OA_{\text{pr}} \approx 3,20 \cdot 10^5 \text{ Бк/м}^3$), интенсивность непрерывного поступления радона из накопителя в технологический процесс извлечения продукта (W_{pr}^h , Бк/ч) по выражению (19) составляет $1,28 \cdot 10^8 \text{ Бк/ч}$. При такой часовой интенсивности в технологический процесс поступает:

- за календарный год $1,12 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$ радона;
- ежесекундно $3,55 \cdot 10^4 \text{ Бк}$ радона.

Результат финального расчета активности выброса радона с поверхности открытого НПР Западной залежи Далматовского месторождения (W_{ar}^h , Бк/ч) по выражению (20) составил 87,8 % от поднимаемой из рудного тела активности радона, а именно $9,17 \cdot 10^8 \text{ Бк/ч}$. При такой часовой интенсивности в атмосферный воздух выбрасывается:

- за календарный год работы откачных насосов $8,04 \cdot 10^{12} \text{ Бк}$ радона;
- ежесекундно $2,55 \cdot 10^5 \text{ Бк}$ радона.

При остановке подачи продуктивного раствора в НПР выброс радона сокращается до полного прекращения по причине радиоактивного распада и полной эксхалляции радона из продуктивного раствора. Остановка подачи раствора в накопитель может происходить в период ремонтных и (или) восстановительных работ, а также при выработке ресурса месторождения.

Приведенные результаты основаны на консервативных предположениях. Возможность применения этих результатов в рамках процесса определения активности выбросов при инвентаризации источников выбросов [19] требует подтверждения результатами измерений, как это предусмотрено [20].

Обсуждение результатов и выводы об интенсивности выброса ^{222}Rn с поверхности накопителя продуктивных растворов при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания

В ранее опубликованных работах было показано, что водные объекты с высоким содержанием радиоактивных веществ лишены барьера безопасности, препятствующего поступлению радионуклидов в атмосферный воздух [21, 22]. Для таких объектов целесообразно проведение предварительной оценки поступления радиоактивных веществ в атмосферный воздух на основе моделей, учитывающих как технологический процесс формирования неорганизованного площадного источника выброса и условия его эксплуатации, так и факторы внешней среды, влияющие на интенсивность выброса [23].

При добыче урана методом СПВ создаются условия для интенсивного выброса ^{222}Rn с поверхности открытых площадных источников. Это связано с естественными для радиоактивного инертного газа закономерностями:

- образовываться в твердом материале при распаде материнского радионуклида (^{226}Ra);
- проникать из твердого материала в полое пространство (эманировать);
- растворяться в жидкостях (продуктивном растворе) и перемещаться с жидкостью в растворенном виде;
- поступать из жидкости в атмосферу при аэрации (барботировании);
- поступать из жидкости в атмосферу при эксхалляции;
- снижать активность согласно закону радиоактивного распада.

Для рассмотренного участка добычи в атмосферу выбрасывается ~88 % радона, поднятого из рудного тела продуктивным раствором. Дополнительные оценки показали, что доминирующей причиной выброса является эффект аэрации при переливе продуктивного раствора из магистрального трубопровода в накопитель, а за счет эксхалляции с поверхности в атмосферу поступает не более 1,1 % от суммарного выброса.

За время нахождения продуктивного раствора в накопителе (менее 1,1 ч) в технологический процесс поступает ~99,2 % радона, оставшегося в растворе после выброса в атмосферу с открытой поверхности НПП. В технологической цепочке радон практически полностью удерживается ионообменными смолами, используемыми для извлечения урана, и лишь незначительная часть его активности поступает в организованный источник. Для рассмотренного участка Западной залежи Далматовского месторождения выброс радона из организованного источника составляет не более 0,5 % от выброса с поверхности НПП.

Выброс ^{222}Rn интенсивностью $2,55 \cdot 10^5$ Бк/с с поверхности накопителя площадью 414 м², с учетом его среднегодового метеорологического разбавления в атмосфере, способен на расстоянии 1 м от края накопителя создать загрязнение воздуха радоном ~220 Бк/м³ (соответствующий фактор разбавления в месте расположения исследуемого накопителя составляет $8,56 \cdot 10^{-4}$ с/м³). Если консервативно принимать коэффициент равновесия между

радоном и его дочерними продуктами распада, создающими основное облучение человека при ингаляции, равным 0,1, то возможная эффективная доза достигает 1,7 мЗв/год. Для оценки принято значение дозового коэффициента для дочерних продуктов распада радона при ингаляции $K_{\text{персонал}} = 9,0 \cdot 10^{-6}$ мЗв·м³/(ч·Бк) или $2,5 \cdot 10^{-12}$ Зв·м³/(с·Бк) в соответствии с МУ 2.6.1.12-01 [24], а время экспозиции – $3,15 \cdot 10^7$ с/год. Полученная величина годовой эффективной дозы превышает минимально значимую дозу 10 мкЗв/год, что подтверждает необходимость контроля и нормирования выброса радона из рассмотренного накопителя продуктивных растворов, эксплуатируемого АО «Далур» в процессе добычи урана методом подземного выщелачивания.

Финансирование

Исследование проведено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Литература

1. Попонин Н. А., Луценко Н. И., Халецкая О. В. АО «Далур» – 20 лет успеха // Горный журнал. 2021. № 5. С. 36–41.
2. Попонин Н. А., Лаптев Ю. И. АО «Далур»: сырьевая база, этапы становления и перспективы развития // Горный журнал. 2016. № 10. С. 6–12. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.01.
3. Бровин К. Г., Грабовников В. А., Шумилин М. В., Языков В. Г. Прогноз, поиск, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием. – Алматы: Гылым, 1997. – 384 с.
4. Уран: геология, ресурсы, производство / Сборник докладов Пятого международного симпозиума (Москва, 23–24 ноября 2021 г.). – М.: ВИМС, 2021. – 409 с. – ISBN 978-5-6046868-3-6.
5. Жуковский М. В., Ярмошенко И. В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. Екб: ИПЭ УрО РАН, 1997.
6. Пруткина М. И., Шашкина В. Л. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 248.
7. Огильви Т. Д., Огильви Н. А., Вырубцова А. В., Дронова М. А. Практическое руководство по измерению радона и растворенного радия в природных водах простейшими методами. Комитет по делам геологии при СНК СССР. – М.; Л.: Госгеолиздат, 1946. – 48 с.
8. Гудзенко В. В., Дубинчук В. Т. Изотопы радия и радона в природных водах. – М.: «Наука», 1987.
9. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact. IAEA Nucl. En. Ser. NG-T-3.15. – Vienna: IAEA, 2016.
10. Балихин А. В. Минерально-сырьевая база урана: современное состояние и перспективы развития. Обзор // Комплексное использование минерального сырья. 2019. № 1 (308). С. 36–50. DOI: 10.31643/2019/6445.05.
11. Акимова И. Д., Бабкин А. С., Воронцова О. М. и др. Геотехнология урана (российский опыт): издание приурочено к 10-летию Горнорудного дивизиона Госкорпорации «Росатом» [монография; ред. коллегия: Солодов И. Н. – глав. ред., Камнев Е. Н.]. Горнорудный дивизион Госкорпорации «Росатом». – М.: КДУ, Университетская книга, 2017. – 574 с.

12. Екидин А. А., Антонов К. Л., Васянович М. Е. Ретроспективная оценка вымывания радона продуктивным раствором при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Траектория исследований – человек, природа, технологии. 2026. № 1 (17). С. 10–19. DOI: 10.56564/27825264-2026-1-10.
13. МУ 2.6.1.1981-05. Радиационный контроль и гигиеническая оценка источников питьевого водоснабжения и питьевой воды по показателям радиационной безопасности. Оптимизация защитных мероприятий источников питьевого водоснабжения с повышенным содержанием радионуклидов. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность: утв. Роспотребнадзором 25.04.2005.
14. Кучеров О. А. и др. Исследование сорбционного извлечения ксенона и криптона из газа-носителя в системе газоочистки жидкосолевого реактора. Часть 2 // Атомная энергия. 2025. Т. 139. № 6. С. 340–345.
15. Самодолова О. А., Самодолов А. П., Николаенко Е. В. Очистка природной воды от радона // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Т. 20. № 3. С. 64–69.
16. Nuccetelli C., Leonardi F., Trevisi R. Building material radon emanation and exhalation rate: need of a shared measurement protocol from the european database analysis. Journal of Environmental Radioactivity, Volume 225, 2020, 106438. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106438.
17. Святецкий В. С., Кузьмин Е. В., Морозов А. А., Марковец В. В., Калакуцкий А. В. Определение коэффициентов эманации и диффузии радона из пластовой закладки на основе хвостов ГМЗ ПАО «ППГХО» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 5. С. 5–15.
18. Гринвуд Н., Эрншо А. Химия элементов: в 2 т. / Т. 2; пер. с англ. – 3-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. – 670 с.
19. Об охране атмосферного воздуха: Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ.
20. Правила разработки и утверждения методик расчета выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками: утв. Постановлением Правительства Российской Федерации от 21.05.2025 № 692.
21. Екидин А. А., Антонов К. Л., Васильев А. В. и др. Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 3 (85). С. 35–46.
22. Екидин А. А., Антонов К. Л., Васянович М. Е., Назарович А. В. Формирование загрязнения тритием атмосферного воздуха над акваториями промышленных водоемов // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 103–113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113.
23. Курындин А. В., Понизов А. В., Шаповалов А. С. и др. Предварительная оценка необходимости нормирования промышленного водоема как источника радиационного воздействия на человека // Ядерная и радиационная безопасность. 2025. № 1 (115). С. 31–40. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.002.
24. МУ 2.6.1.12-01. Определение индивидуальных эффективных доз облучения персонала от короткоживущих дочерних продуктов изотопов радона. 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность: утв. и введены в действие Федеральным управлением медико-биологических и экстремальных проблем при Минздраве России 26.03.2001 и Министерством Российской Федерации по атомной энергии 28.04.2001.

References

1. Poponin N. A., Lutsenko N. I., Khaletskaya O. V. (2021). AO “Dalur” – 20 let uspekha [JSC “Dalur” – 20 years of success]. Gornyi zhurnal – Mining Journal, No. 5, pp. 36–41. [in Russian].
2. Poponin N. A., Laptev Yu. I. (2016). AO “Dalur”: syr'evaya baza, ehtapy stanovleniya i perspektivy razvitiya [JSC “Dalur”: raw material base, stages of formation, and development prospects]. Gornyi zhurnal – Mining Journal, No. 10, pp. 6–12. DOI: 10.17580/gzh.2016.10.01. [in Russian].
3. Brovin K. G., Grabovnikov V. A., Shumilin M. V., Yazikov V. G. (1997). Prognoz, poisk, razvedka i promyshlennaya otsenka mestorozhdenii urana dlya otrabotki podzemnym vyshchelachivaniem [Forecast, prospecting, exploration, and industrial evaluation of uranium deposits for in-situ leach mining]. Almaty: Gylym, 384 p. [in Russian].

4. Uran: geologiya, resursy, proizvodstvo (2021). [Uranium: geology, resources, and production]. Sbornik dokladov Pyatogo mezhdunarodnogo simpoziuma – Proceedings of the Fifth International Symposium (Moscow, November 23–24, 2021). Moscow: VIMS, 409 p. ISBN 978-5-6046868-3–6. [in Russian].
5. Zhukovsky M. V., Yarmoshenko I. V. (1997). Radon: izmerenie, dozy, otsenka riska [Radon: measurement, doses, and risk assessment]. Yekaterinburg: IPE UB RAS [in Russian].
6. Prutkina M. I., Shashkina V. L. (1975). Spravochnik po radiometricheskoi razvedke i radiometricheskomu analizu [Handbook of radiometric prospecting and radiometric analysis]. Moscow: Atomizdat, p. 248. [in Russian].
7. Ogilvie T. D., Ogilvie N. A., Vyrubova A. V., Dronova M. A. (1946). Prakticheskoe rukovodstvo po izmereniyu radona i rastvorennogo radiya v prirodnykh vodakh prosteishimi metodami. Komitet po delam geologii pri SNK SSSR [Practical guide to measuring radon and dissolved radium in natural waters by the simplest methods. Committee on geology under the council of people's commissars of the USSR]. Moscow; Leningrad: Gosgeolizdat, 48 p. [in Russian].
8. Gudzenko V. V., Dubinchuk V. T. (1987). Izotopy radiya i radona v prirodnykh vodakh [Isotopes of radium and radon in natural waters]. Moscow: “Nauka”. [in Russian].
9. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact. IAEA Nucl. En. Ser. NG-T-3.15. Vienna: IAEA, 2016.
10. Balikhin A. V. (2019). Mineral'no-syr'evaya baza urana: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. Obzor [Mineral resources base of uranium: current status and development prospects. Review] Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya – Integrated use of mineral resources. No. 1 (308), pp. 36–50. DOI: 10.31643/2019/6445.05. [in Russian].
11. Akimova I. D., Babkin A. S., Vorontsova O. M., et al. (2017). Geotekhnologiya urana (rossiiskii opyt): izdanie priurocheno k 10-letiyu Gornorudnogo diviziona Goskorporatsii “Rosatom” [Uranium Geotechnology (Russian Experience): the publication is dedicated to the 10th anniversary of the Mining Division of the State Corporation “Rosatom”]. Monograph; editorial board: Solodov I. N. – editor-in-chief, Kamnev E. N. Gornorudnyi divizion Goskorporatsii “Rosatom” – Mining Division of the State Corporation “Rosatom”. Moscow: KDU, University book, 574 p. [in Russian].
12. Ekin A. A., Antonov K. L., Vasyanovich M. E. (2026). Retrospektivnaya otsenka vymyvaniya radona produktivnym rastvorom pri dobyche urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniya [Retrospective assessment of radon washout by productive solution during uranium mining by the borehole underground leaching method]. Traektoriya issledovaniy – chelovek, priroda, tekhnologii – Research trajectory – man, nature, technology, No. 1 (17), pp. 10–19. DOI: 10.56564/27825264-2026-1-10. [in Russian].
13. MU 2.6.1.1981-05 “Radiatsionnyy kontrol' i gigienicheskaya otsenka istochnikov pit'yevogo vodosnabzheniya i pit'yevoy vody po pokazatelyam radiatsionnoy bezopasnosti. Optimizatsiya zashchitnykh meropriyatiy istochnikov pit'yevogo vodosnabzheniya s povyshennym soderzhaniem radionuklidov”. 2.6.1. Ioniziruyushchee izluchenie, radiatsionnaya bezopasnost' [MU 2.6.1.1981-05 “Radiation control and hygienic assessment of drinking water sources and drinking water based on radiation safety indicators. Optimization of protective measures for drinking water sources with elevated radionuclide content”. 2.6.1. Ionizing radiation, radiation safety]. 2005.
14. Kucherov O. A. et al. (2025). Issledovanie sorbtionnogo izvlecheniya ksenona i kriptona iz gaza-nositelya v sisteme gazoochistki zhidkosolevogo reaktora. Chast' 2 [Study of xenon and krypton sorption extraction from carrier gas in the gas purification system of a molten salt reactor. Part 2]. Atomnaya ehnergiya – Atomic energy, vol. 139, No. 6, pp. 340–345. [in Russian].
15. Samodolova O. A., Samodolov A. P., Nikolaenko E. V. (2020). Ochistka prirodnoi vody ot radona [Radon removal from natural water]. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura – Bulletin of the South Ural State University. Series: Construction and Architecture, vol. 20, No. 3, pp. 64–69. [in Russian].
16. Nucetelli C., Leonardi F., Trevisi R. (2020). Building material radon emanation and exhalation rate: Need of a shared measurement protocol from the European database analysis. Journal of Environmental Radioactivity, vol. 225, 106438. Doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106438.
17. Svyatetskiy V. S., Kuzmin E. V., Morozov A. A., Markovets V. V., Kalakutskiy A. V. (2017). Opredelenie koefitsientov ehmanatsii i diffuzii radona iz plastovoi zakladki na osnove khvostov GMZ PAO “PPGKHO” [Determination of radon emanation and diffusion coefficients from a backfill based on tailings from the GMZ

of PJSC PIMCU]. Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' – Mining Information and Analytical Bulletin, No. 5, pp. 5–15. [in Russian].

18. Greenwood N., Earnshaw A. (2015). Khimiya ehlementov [Chemistry of the Elements]. In 2 volumes. Vol. 2 / Trans. from English. 3rd ed. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 670 p. [in Russian].

19. Federal'nyi zakon ot 04.05.1999 No. 96-FZ “Ob okhrane atmosfernogo vozdukha” [Federal law of 04.05.1999 No. 96-FZ “On atmospheric air protection”]. 1999.

20. “Pravila razrabotki i utverzhdeniya metodik rascheta vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferyni vozdukh statsionarnymi istochnikami”: utv. Postanovleniem Pravitel'stva Rossiiskoi Federatsii ot 21.05.2025 No. 692 [“Rules for the development and approval of methods for calculating pollutant emissions into the atmospheric air from stationary sources”: approved by decree of the Government of the Russian Federation dated 21.05.2025 No. 692]. 2025.

21. Ekin A. A., Antonov K. L., Vasiliev A. V., et al. (2017). Otsenka postupleniya tritiya v atmosferu iz bryzgal'nykh basseinov Balakovskoi AEHS v kholodnyi period [Assessment of tritium emissions into the atmosphere from the Balakovo NPP spray pools during the cold period]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (85), pp. 35–46. [in Russian].

22. Ekin A. A., Antonov K. L., Vasyanovich M. E., Nazarovich A. V. (2022). Formirovanie zagryazneniya tritiem atmosfernogo vozdukha nad akvatoriyami promyshlennykh vodoemov [Formation of tritium pollution of atmospheric air over industrial reservoirs]. Radioaktivnye otkhody – Radioactive Waste, No. 4 (21), pp. 103–113. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-4-103-113. [in Russian].

23. Kuryndin A. V., Ponizov A. V., Shapovalov A. S., et al. (2025). Predvaritel'naya otsenka neobkhodimosti normirovaniya promyshlennogo vodoema kak istochnika radiatsionnogo vozdeistviya na cheloveka [Preliminary assessment of the need to standardize an industrial reservoir as a source of radiation exposure to humans]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and radiation safety Journal, No. 1 (115), pp. 31–40. DOI: 10.26277/SECNRS.2025.115.1.002. [in Russian].

24. MU 2.6.1.12-01 “Opredelenie individual'nykh ehffektivnykh doz oblucheniya personala ot korotkozhiyushchikh dochernikh produktov izotopov radona”. 2.6.1. Ioniziruyushchee izluchenie, radiatsionnaya bezopasnost' [MU 2.6.1.12-01 “Determination of individual effective doses of personnel exposure to short-lived daughter products of radon isotopes”. 2.6.1. Ionizing radiation, radiation safety]. 2001.

Сведения об авторах

Екидин Алексей Акимович, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (620219, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20а).

Антонов Константин Леонидович, старший научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (620219, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20а).

Васянович Максим Евгеньевич, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (620219, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20а).

Пышкина Мария Дмитриевна, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения Российской академии наук (620219, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20а).

Понизов Антон Владимирович, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Курындин Антон Владимирович, заместитель директора, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Шаповалов Альберт Сергеевич, начальник отдела аварийной готовности и радиационной защиты, федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Красносельский, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Юрин Вячеслав Владимирович, начальник службы радиационной безопасности, Акционерное общество «Далур» (641750, Курганская обл., Далматовский р-н, с. Уксянское, ул. Лесная, д. 1).

Вдовин Александр Сергеевич, главный специалист по радиационному контролю, Акционерное общество «Далур» (641750, Курганская обл., Далматовский р-н, с. Уксянское, ул. Лесная, д. 1).

Authors credentials

Ekidin Alexey Akimovich, Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20a, Sofyi Kovalevskoy str., Yekaterinburg, 620219), e-mail: ekidin@mail.ru.

Antonov Konstantin Leonidovich, Senior Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20a, Sofyi Kovalevskoy str., Yekaterinburg, 620219), e-mail: antonov.k@gmail.com.

Vasyanovich Maksim Evgenevich, Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20a, Sofyi Kovalevskoy str., Yekaterinburg, 620219), e-mail: Vasyanovich_maks@mail.ru.

Pyshkina Maria Dmitrievna, Researcher, Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20a, Sofyi Kovalevskoy str., Yekaterinburg, 620219), mdpyshkina@gmail.com.

Ponizov Anton Vladimirovich, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: ponizov@secnrs.ru.

Kuryndin Anton Vladimirovich, Deputy Director, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: kuryndin@secnrs.ru.

Shapovalov Albert Sergeevich, Head of the Department of Emergency Preparedness and Radiation Protection, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 bld. 5, Malaya Krasnoselskaya str., vn. ter. g. municipalnyi okrug Krasnoselskii, Moscow, 107140), e-mail: shapovalov@secnrs.ru.

Yurin Vyacheslav Vladimirovich, Head of the Radiation Safety Service, Joint-Stock Company “Dalur” (1, Lesnaya str., Uksyanskoye vill., Dalmatovskiy dist., Kurgan reg., 641750), e-mail: VVYurin@rosatom.ru.

Vdovin Alexander Sergeevich, Chief specialist on radiation control, Joint-Stock Company “Dalur” (1, Lesnaya str., Uksyanskoye vill., Dalmatovskiy dist., Kurgan reg., 641750), e-mail: ASVdovin@rosatom.ru.

Для цитирования

Екидин А. А., Антонов К. Л., Васянович М. Е., Пышкина М. Д., Понизов А. В., Курындин А. В., Шаповалов А. С., Юрин В. В., Вдовин А. С. Естественные и технологические процессы формирования площадных источников выброса радона при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания // Ядерная и радиационная безопасность. 2026. № 3 (121). С. 17–31. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.002.

For citation

Ekidin A. A., Antonov K. L., Vasyanovich M. E., Pyshkina M. D., Ponizov A. V., Kuryndin A. V., Shapovalov A. S., Yurin V. V., Vdovin A. S. (2026). Estestvennye i tekhnologicheskie protsessy formirovaniya ploshchadnykh istochnikov vybrosa radona pri dobyche urana metodom skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniya [Natural and technological processes of site radon emission sources formation during uranium mining by in-situ borehole leaching method]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' – Nuclear and Radiation Safety Journal, No. 3 (121), pp. 17–31. [in Russian]. DOI: 10.26277/SECNRS.2026.121.3.002.

