УДК 622.349.5:546.296 10.56564/27825264_2026_1_10

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЫМЫВАНИЯ РАДОНА ПРОДУКТИВНЫМ РАСТВОРОМ ПРИ ДОБЫЧЕ УРАНА МЕТОДОМ СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

А. А. Екидин, К. Л. Антонов, М. Е. Васянович

Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В статье рассмотрен малоизученный специфичный фактор радиационного воздействия на окружающую среду и человека при нормальной эксплуатации установок добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания. На примере доступных данных о годовой добыче природного урана и значений основных геотехнологических характеристик выполнена оценка вымывания радона продуктивным раствором. В расчетах учитывались потери при извлечении урана из руд в раствор на уровне 20 % и потери при извлечении урана из раствора в готовый продукт – 4 %. Значение оцениваемой величины (активности радона в продуктивном растворе) существенно зависит от общей пористости и плотности горных пород, количества и производительности насосов продуктивного раствора. При добыче 600 т урана в год продуктивным раствором из порового пространства разрабатываемого месторождения каждый месяц вымывалось от 14,1 до 19,3 ТБк радона. Удельная активность радона в продуктивном растворе составляла от 13,8 до 18,8 кБк/л.

Ключевые слова; уран; раствор; скважное выщелачивание; вымывание; активность; объем; пористость; производительность.

1. Введение

Наиболее распространенный в мире способ добычи урана – скважинное подземное выщелачивание (СПВ). Его доля в мировом производстве урана увеличилась с 20 % в 2005 г. до 56 % в 2020 г. [1]. В отличии 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 значительно меньше объектов промышленного и гражданского назначения, что приводит к снижению себестоимости получения конечной продукции и повышению производительности труда [2].

Для селективного извлечения урана выщелачивающими растворами из руды на месте ее залегания в рудное тело через систему закачных скважин подается 1–2 %-я серная кислота или карбонатный раствор, которые вскрывают урановые минералы, просачиваясь через рудный пласт [3]. Вывод продуктивных растворов, обогащенных ураном, на поверхность производится через систему откачных скважин [4]. Технологическая операция по извлечению урана, находящегося в составе поднятых на поверхность продуктивных растворов, включает переработку по ионообменной технологии на технологической установке с получением конечной продукции – концентрата природного урана (полиуранатa аммония) [5].

Добыча урана методом СПВ исключает контакт персонала с радиоактивными урановыми рудами и минимизирует воздействие пылерадиационного фактора на работников, что улучшает санитарно-гигиенические условия труда. Метод СПВ при нормальной эксплуатации скважин и магистральных трубопроводов характеризуется минимальными нарушениями земной поверхности. Отсутствие отвалов пустой породы и необходимости дробления руды исключает загрязнение окружающей среды характерными вредными веществами (отвальные воды, пыль, шламы и др.). Технология добычи урана методом СПВ не предусматривает сбросов радиоактивных веществ в гидрографическую сеть.

К числу часто рассматриваемых факторов воздействия на окружающую среду относят [6–10]:

– загрязнение подземных вод петрогенными и техногенными веществами (уран, серная кислота, железо, алюминий и др.);

– загрязнение земной поверхности продуктивными растворами в случае нарушения целостности труб или неисправности их соединений;

– поступление в атмосферу аэрозолей химических реагентов технологических растворов;

– образование твердых низкоактивных отходов.

Малоизученным остается фактор вымывания радона (^{222}Rn) продуктивными растворами, его подъем на поверхность и последующее поступление в атмосферу. В настоящей работе выполнена оценка вероятной активности радона, вымываемого продуктивными растворами из рудного тела при добыче урана на разрабатываемых АО «Далур» месторождениях. Полученная оценка носит ретроспективный характер, так как основывается на данных о достигнутой предприятием производительности готовой продукции ~600 т в год за период 2017–2020 гг. [1, 5].

2. Материалы и методы

Реализованный в исследовании алгоритм оценки вымывания радона продуктивным раствором предусматривал решение ряда задач для определения:

– объема рудного тела, в котором происходило выщелачивание урана (формулы 1–3 ниже);

– объема порового пространства и удельной активности радона в поровом пространстве рассматриваемого рудного тела (формулы 4–6);

– постоянной вымывания радона из порового пространства и сформированной удельной активности радона в поровом пространстве в условиях динамического равновесия (формулы 7–10);

– суммарной активности вымывания радона из порового пространства месторождения (формула 11).

Для решения поставленных задач рассматривалась цепочка распада ^{238}U. До начала добычи методом СПВ активность урана, радия и радона в рудном теле и пространстве пор находится в вековом равновесии. Все выполненные расчеты активности урана, радия и радона относятся к изотопам ^{238}U, ^{226}Ra и ^{222}Rn соответственно. Удельная активность 1 г природного урана (24,8 кБк/г) складывается из парциального вклада в активность изотопов: 0,99284 A_{U238}, 0,00711 A_{U235}; 0,000055 A_{U234}. Дочерний продукт распада ^{238}U – ^{234}U имеет ту же активность, что и материнский радионуклид. Распад ^{235}U не приводит к образованию ^{226}Ra и не вносит вклад в образование ^{222}Rn. Активность ^{226}Ra в условиях векового равновесия определяется только активностью материнского ^{238}U, что подтверждает установленное для горных пород, не затронутых процессам выщелачивания, соотношение Ra/U = $3{,}4 \cdot 10^{-7}$, т. е. на 1 т металлического урана приходится 0,34 г радия [11].

Получение готовой продукции сопровождается контролируемыми потерями урана при его извлечении из рудного тела в раствор (L_1, %) и при извлечении из продуктивного раствора в готовую продукцию (L_2, %) [12]. Данные о массе готовой продукции (FP_U, т) и значениях контролируемых потерь (L_1 и L_2) позволяют оценить запасы урана (M_U, т) в разрабатываемом рудном теле:

$$M_U = FP_U\left(1 + \frac{L_1 + L_2}{100\ \%}\right), \text{ т.} \quad (1)$$

Полученное значение запаса урана (M_U) позволяет рассчитать массу (M_{total}) и объем (V_{total}) разрабатываемого рудного тела:

$$M_{total} = \frac{M_U}{E_U} \cdot 100\ \%, \text{ т,} \quad (2)$$

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

где M_{total} – суммарная масса горной породы разрабатываемого рудного тела, т; M_U – суммарный запас природного урана в разрабатываемом рудном теле, т; E_U – среднее содержание природного урана в горной породе, %; V_{total} – суммарный объем горной породы в разрабатываемом рудном теле, м^3; ρ – средняя плотность горной породы, т/м^3.

С учетом того, что движение раствора для добычи урана методом выщелачивания происходит по поровому пространству, необходимо определить суммарный объем порового пространства (V_{pores}) и удельную активность радона в поровом пространстве (A_V) месторождения:

$$V_{pores} = V_{total} \cdot \frac{n}{100\%}, \text{ м}^3, \quad (4)$$

$$A_{Rn} = A_{Ra} = A_{U238}, \text{ Бк}, \quad (5)$$

$$A_{V0} = \frac{A_{Rn} \cdot \varphi}{V_{pores}}, \text{ Бк/м}^3, \quad (6)$$

где V_{pores} – суммарный объем пор в разрабатываемых блоках месторождения, м^3; n – пористость горных пород месторождения, %; A_{V0} – удельная активность радона в поровом пространстве не разрабатываемого месторождения, Бк/м^3; φ – коэффициент эманирования (доля радона, выходящая из зерен твердого вещества в поры); A_{Rn} – суммарная активность радона в блоках месторождения до разработки, Бк; A_{Ra} – суммарная активность радия в блоках месторождения, Бк;
A_{U238} – суммарная активность урана-238 в блоках месторождения, Бк.

Для получения консервативной (максимальной) оценки принимается:

- $A_{Ra} = const$;
- радий равномерно распределен по всему объему рудного тела;
- φ = 1 (весь радон в порах).

Для растворения урана в рудном теле используется раствор серной кислоты. Сульфаты радия относятся к нерастворимым соединениям, поэтому предполагается, что продуктивным раствором не будет производится вынос радия из рудного тела.

Извлечение продуктивного раствора приведет к снижению удельной активности радона (A_V) в поровом пространстве за счет вымывания радона этим же раствором. Вновь установленная в динамическом равновесии суммарная активность радона в блоках разрабатываемого месторождения (A_{Rn}^{dyn}) определяется скоростью его распада (λ_{Rn}) и вымывания (λ_{wash}) продуктивным раствором:

$$\lambda_{wash} = \frac{Q}{V_{pores}}, \text{ ч}^{-1}, \quad (7)$$

$$A_{Rn}^{dyn} = A_{Ra} \cdot \frac{\lambda_{Rn}}{\lambda_{Rn}+\lambda_{wash}}, \text{ Бк}, \quad (8)$$

$$A_V = \frac{A_{Rn}^{dyn} \cdot \varphi}{V_{pores}}, \text{ Бк/м}^3, \quad (9)$$

где λ_{wash} – постоянная вымывания радона продуктивным раствором, ч$^{-1}$; λ_{Rn} – постоянная распада радона, 2,1·10^{-6} с$^{-1}$; Q – суммарная производительность насосов продуктивного раствора, м^3/ч; A_{Rn}^{dyn} – установившаяся активность радона в порах разрабатываемого месторождения, Бк; A_V – установившаяся удельная активность радона в поровом пространстве разрабатываемого месторождения, Бк/м^3.

Для оценки величины суммарной производительности насосов продуктивного раствора (Q), способных обеспечить достигнутую годовую производительность готовой урановой продукции, учитываются:

- потери при извлечении урана из продуктивного раствора в готовую продукцию (L_2, %);

– среднее значение концентрации урана в продуктивном растворе (S_U, т/м^3):

$$Q = \frac{FP_U}{S_U \cdot 8760} \cdot (1 + \frac{L_2}{100\%}), \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (10)$$

где 8 760 – количество часов в календарном году, ч.

Тогда суммарная активность радона (W_t, Бк), вымываемого продуктивным раствором из рудного тела за выбранный период времени работы насосов (t, ч), рассчитывается по формуле:

$$W_t = A_V \cdot Q \cdot t, \text{ Бк}. \quad (11)$$

Рассмотренный алгоритм расчета и принятые условия позволяют выполнить оценку суммарной активности радона, вымываемого продуктивным раствором из конкретного разрабатываемого месторождения урана, методом скважинного подземного выщелачивания. Для последующей оценки радиационного воздействия радона, содержащегося в продуктивном растворе, необходимо учитывать его распад на этапах перемещения раствора:

– в рудном теле до откачной скважины;

– при подъеме на дневную поверхность по откачной скважине;

– в магистральных трубопроводах от откачных скважин до бассейна сбора продуктивных растворов.

Величина радиационного воздействия радона на персонал, население и окружающую среды будет определяться характеристиками конкретных организованных и неорганизованных источников его поступления в атмосферу и сопутствующими метеорологическими условиями.

3. Результаты

Известно, что АО «Далур» добывает около 600 т урана в год в виде готовой продукции [1, 5]. Для такой интенсивности добычи урана в виде готовой продукции, с учетом потерь при извлечении урана из руд в раствор (L_1) 20 % и потерь при извлечении урана из раствора в готовый продукт (L_2) 4 % [12], запас урана в рудном теле согласно выражению (1) должен быть не менее 744 т. При среднем содержании урана в руде (E_U) 0,039 % [5, 10] масса горной породы, из которой извлекается уран методом СПВ, M_{total} = 1 907 692 т по формуле (2). Принимая плотность горных пород ρ = 1,6 т/м^3, по формуле (3) получена оценка суммарного объема горной породы в разрабатываемых блоках месторождения V_{total} = 1 192 308 м^3.

Хорошая проницаемость геологической среды, содержащей урановую минерализацию, – обязательное условие применения метода СПВ [13]. Значение пористости осадочных пород разрабатываемых месторождений урана может находиться в диапазоне от 25 % (пески уплотненные) до 40 % (глины платформенных областей) [14]. Тогда оценки суммарного объема пор (V_{pores}) лежат в диапазоне от 298 077 м^3 до 476 923 м^3.

Принимая, что активность урана-238 в 1 г природного урана составляет 12,3 кБк, определена активность радона в рудном теле, содержащем 744 т природного урана, в условиях векового равновесия с радием и радоном согласно выражению (5): $A_{Rn} = A_{Ra} = A_{U238}$ = 9,15·10^{12} Бк. Объемная активность радона в поровом пространстве рудного тела до разработки (A_{V0}) находилась в диапазоне от 1,92·10^7 Бк/м^3 при пористости горной породы 40 % до 3,07·10^7 Бк/м^3 при пористости горной породы 25 %.

В процессе добычи урана методом СПВ его концентрация в продуктивном растворе меняется в широком диапазоне от 10 до 500 мг/л [15]. В расчетах настоящего исследования использовано наиболее часто применяемое значение на основе установившейся практики (величина S_U), равное 50 мг/л, или 5,00·10^{-5} т/м^3 [16]. Суммарная производительность насосов продуктивного раствора (Q), способных обеспечить достигнутый уровень производства готовой урановой продукции в 600 т/год с учетом потерь, составляет 1 425 м^3/ч. Такую производительность можно получить

с помощью насосов производительностью 10 м^3/ч каждый, размещенных не менее чем в 142 откачных скважинах.

Для оценки изменения абсолютной и удельной активности радона при установленной производительности насосного оборудования по формуле (7) рассчитано значение постоянной вымывания λ_{wash} = 0,00478 час$^{-1}$, или 1,33·10^{-6} с$^{-1}$ для пористости пород 25 % и 0,00299 час$^{-1}$, или 8,30·10^{-7} с$^{-1}$ для пористости пород 40 %. Полученные значения по порядку величины близки к скорости радиоактивного распада радона λ_{Rn} = 2,1·10^{-6} с$^{-1}$. Поэтому с учетом двух процессов следует ожидать, что извлечение продуктивного раствора существенно снизит удельную активность радона (A_V) в поровом пространстве, но не приведет ее к нулевому значению.

Действительно, расчет сформированного запаса активности радона (A_{Rn}^{dyn}) в разрабатываемом месторождении при условии установленного динамического равновесия по выражению (8) показал, что для пористости пород 25 % A_{Rn}^{dyn} = 5,61·10^{12} Бк (снижение относительно исходной активности радона в рудном теле до разработки месторождения примерно на 39 %), а для пористости 40 % – 6,56·10^{12} Бк (снижение на 28 %). Установившаяся удельная активность радона в поровом пространстве, согласно формуле (9), составляет A_V = 1,88·10^7 Бк/м^3 при пористости пород 25% и 1,38·10^7 Бк/м^3 при пористости 40%. Таким образом, удельная активность радона в продуктивном растворе в локальной области вымывания составит от 13,8 до 18,8 кБк/л соответственно для пористости 40 и 25 %.

При установленной суммарной производительности насосов продуктивного раствора Q = 1 425 м^3/ч, согласно выражению (11), без учета распада, на дневную поверхность будет транспортироваться от W_{hour} ≈ 19,6 ГБк/ч (или W_{sec} ≈ 5,44 МБк/с) до W_{hour} ≈ 26,8 ГБк/ч (или W_{sec} ≈ 7,44 МБк/с) радона.

4. Обсуждение

За месяц работы установки добычи урана методом СПВ из рудного тела будет вымываться от 14,1 до 19,3 ТБк радона. Оценки сформированной удельной активности радона в поровом пространстве и выноса радона при постоянном расходе продуктивного раствора существенно зависят от значения пористости горных пород месторождения. Чем меньше пористость, тем больше вымывается активности радона.

Установленный масштаб активности радона, вымываемого и поднимаемого на дневную поверхность продуктивным раствором, не позволяет сделать оценку радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду без дополнительных данных о количестве источников поступления радона в атмосферу и их характеристик. На участках добычи от устьев скважин до технологических накопителей продуктивных растворов, включающих трубопроводные обвязки, магистральные и рядовые эстакады трубопроводов, маловероятно наличие источников интенсивного выхода радона в атмосферный воздух. Наиболее значимые источники выброса радона в атмосферный воздух из продуктивных растворов – технологические накопители продуктивных растворов (рис. 1). Выход радона будет происходить при поступлении раствора из магистральных трубопроводов в накопитель. За счет эффекта барботирования может удаляться до 95 % радона, содержащегося в растворе[1].

Открытые поверхности накопителей представляют собой неорганизованные площадные источники выброса радона в атмосферный воздух за счет эксхаляции, которая зависит от ряда параметров продуктивного раствора (температуры, минерализации) и скорости ветра над поверхностью накопителя. Повышение

[1] МУ 2.6.1.1981-05.2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. 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. Методические указания. Утв.Роспотребнадзором 25.04.2005 г.

температуры снижает отношение активности радона в жидкости к активности в воздухе. Присутствие растворенных солей снижает растворимость радона, что дополнительно стимулирует его эксхаляцию по сравнению с пресной водой. Увеличение скорости ветра над поверхностью накопителя увеличивает интенсивность перемешивания и выхода радона из раствора в атмосферу. Радиационное воздействие на человека будет определяться метеоусловиями, характеризующими разбавление радона в атмосфере после эксхаляции из продуктивного раствора.

Рис. 1. Внешний вид технологического накопителя продуктивных растворов

Для решения задачи определения уровней радиационного воздействия радона на персонал, население и окружающую среду при добыче урана методом скважинного подземного выщелачивания необходимы исследования внешних и технологических условий функционирования каждого отдельного накопителя продуктивных растворов.

Выводы

1. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания сопровождается транспортированием активности радона от рудного тела на дневную поверхность с возможностью поступления в атмосферный воздух на участках технологического процесса, где отсутствуют барьеры безопасности.
2. Активность радона, вымываемого из рудного тела, определяется:
   - запасами и содержанием урана;
   - объемом разрабатываемого рудного тела;
   - пористостью горных пород;
   - производительностью насосов продуктивного раствора.
3. Для рассмотренного примера ежегодной добычи 600 т урана требуемая суммарная производительность откачных насосов 1 425 $м^3$/ч обеспечивает формирование удельной активности радона в поровом пространстве в условиях динамического равновесия, равной от 13,8 до 18,8 $МБк/м^3$, что примерно на треть меньше, чем в условиях векового равновесия.

4. За год непрерывной работы вымывание радона из рудного тела продуктивным раствором может составить от 169 до 232 ТБк.

5. Полученные в ходе исследований результаты необходимы для последующей оценки поступления радона из технологических накопителей продуктивных растворов рассмотренного месторождения в атмосферный воздух и возможного радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду.

Благодарности

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

Список литературы

1. Уран: геология, ресурсы, производство : сб. докладов Пятого Международного симпозиума, Москва, 23–24 ноября 2021 года. – Москва : ВИМС, 2021. – 409 с. – ISBN 978-5-6046868-3-6. – EDN JMRWIZ.
2. *Попонин, Н. А.* АО «Далур» – 20 лет успеха / Н. А. Попонин, Н. И. Луценко, О. В. Халецкая. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2021. – № 5. – С. 36–41. – EDN DOZOIV.
3. *Балихин, А. В.* Минерально-сырьевая база урана: современное состояние и перспективы развития. Обзор / А. В. Балихин. – Текст : непосредственный // Комплексное использование минерального сырья. – 2019. – № 1 (308). – С. 36–50. – DOI 10.31643/2019/6445.05. – EDN ZAXCBV.
4. Геотехнология урана (российский опыт) : [монография] / И. Д. Акимова, А. С. Бабкин, О. М. Воронцова [и др.] ; под ред. И. Н. Солодова, Е. Н. Камнева ; Горнорудный дивизион Госкорпорации «Росатом». – Москва : КДУ : Университетская книга, 2017. – 574 с. – ISBN 978-5-91304-754-0.
5. *Попонин, Н. А.* АО «Далур»: сырьевая база, этапы становления и перспективы развития / Н. А. Попонин, Ю. И. Лаптев. – Текст : непосредственный // Горный журнал. – 2016. – № 10. – С. 6–12. – DOI 10.17580/gzh.2016.10.01. – EDN XCLGON.
6. Моделирование геоэкологических последствий разработки месторождения урана способом подземного выщелачивания / Т. С. Теровская, А. Г. Кеслер, Ю. И. Лаптев [и др.]. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2021. – № 2. – С. 59–65. – EDN CVAYAY.
7. *Ахмедова, Н. М.* Экологические последствия добычи урана методом подземного выщелачивания и оценка влияния радионуклидов на окружающую среду / Н. М. Ахмедова, А. Х. Тошназаров, А. Р. Мухаммадиев // Евразийский союз ученых. – 2020. – №11–7(80). – С.7–12. – DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.7.80.1138. – EDN FVJHHE.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610552 Российская Федерация. Моделирование геоэкологического состояния месторождений АО «Далур», разрабатываемых способом подземного выщелачивания: № 2015661283: заявл. 23.11.2015 : опубл. 14.01.2016 / А. С. Бабкин, А. Д. Истомин, А. Г. Кеслер [и др.]; заявитель Акционерное общество «Далур». – EDN ICWMKU.
9. Опыт проведения независимого общественного контроля радиационноопасных объектов / А. А. Екидин, А. В. Васильев, М. Е. Васянович [и др.] // Траектория исследований – человек, природа, технологии. – 2023. – №1(5). – С.87–103. – DOI 10.56564/27825264_2023_1_87. – EDN LNXQFU.
10. Материалы обоснования лицензии на осуществление отдельных видов деятельности, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, в соответствии с законодательством Российской Федерации в области использования атомной энергии. Размещение, сооружение, эксплуатационных источников, пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных отходов. Акционерное общество «Далур». 2020 год. [Электронный ресурс]. – URL: https://dalur.armz.ru/ru/sotsialnaya-otvetstvennost/otsenka-vozdejstviya-na-okruzhayushchuyu-sred (дата обращения: 02.02.2026).
11. Практическое руководство по измерению радона и растворенного радия в природных водах простейшими методами / Т. Д. Огильви, Н. А. Огильви, А. В. Вырубова, М. А. Дронова ; Комитет по делам геологии при СНК СССР. – Москва ; Ленинград : Госгеолиздат, 1946. – 48 с. – Текст : непосредственный.

12. Устранение потерь и разубоживания урана при скважинном подземном выщелачивании / И. Н. Солодов, С. В. Полонянкина, Л. Ю. Воробьева [и др.]. – Текст : непосредственный // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 7. – С. 52–58. – EDN UUUJZR.
13. Прогноз, поиск, разведка и промышленная оценка месторождений урана для отработки подземным выщелачиванием / К. Г. Бровин, В. А. Грабовников, М. В. Шумилин, В. Г. Язиков. – Алматы : Гылым, 1997. – 384 с. – Текст : непосредственный.
14. Справочное руководство гидрогеолога : в 2 т. Т. 1 / В. М. Максимов, В. Д. Бабушкин, Н. Н. Веригин [и др.] ; под ред. В. М. Максимова. – 3-е изд., переработанное и дополненное. – Ленинград : Недра, 1979. – 512 с. – Текст : непосредственный.
15. *Авазов, Р. Р.* Подготовка продуктивных растворов скважинного подземного выщелачивания к сорбции урана / Р. Р. Авазов, Б. Х. Нуртаев, К. А. Темиров. – Текст : непосредственный // Universum: технические науки. – 2021. – № 3-3 (84). – С. 12–14. – EDN IHYRKP.
16. ТКП 17.04-48-2012 (02120). Охрана окружающей среды и природопользование. Недра. Правила применения классификации запасов к месторождениям урановых руд. – Введен 01.07.2012. – Минск : Минприроды, 2012. – 34 с. – (Технический кодекс установившейся практики). – Текст : непосредственный.

Сведения об авторах:

Екидин Алексей Акимович, к. ф.-м. н., в. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия. Эл.почта: ekidin@mail.ru.

Антонов Константин Леонидович, к. ф.-м. н., с. н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

Васянович Максим Евгеньевич, к. ф.-м. н., н. с. Института промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия.

A RETROSPECTIVE ASSESSMENT OF RADON REMOVAL BY A PRODUCTIVE SOLUTION DURING URANIUM MINING USING THE IN-SITU LEACHING METHOD

A. A. Ekidin, K. L. Antonov, M. E. Vasyanovich

Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

This article examines a poorly understood specific factor affecting the environment and humans during the normal operation of uranium mining facilities using the in-situ leaching method. Using available data on annual natural uranium production and key geotechnical parameters, an estimate of radon leaching by the pregnant solution was made. The calculations took into account losses of 20 % during uranium extraction from ore into solution and 4 % during uranium extraction from solution into the finished product. The estimated value (radon activity in the productive solution) significantly depends on the overall porosity and density of the rock mass, as well as the number and capacity of productive solution pumps. For a uranium-mining rate of 600 tonnes per year using the method under consideration, between 14.1 and 19.3 TBq of radon were leached from the pore space of the developed deposit by the pregnant solution each month. The specific activity of radon in the productive solution ranged from 13.8 to 18.8 kBq/L.

Keywords: uranium, solution, borehole leaching, radon removal, activity, volume, porosity, productivity.

References

1. Trudy Pyatogo Mezhdunarodnogo simpoziuma «Uran: geologiya, resursy, proizvodstvo»: SBORNIK DOKLADOV, Moskva, 23–24 noyabrya 2021 goda. – Moskva: FGBU «VIMS», 2021. – 409 s. – ISBN 978-5-6046868-3-6. – EDN JMRWIZ. [in Russian].
2. *Poponin, N. A.* AO «Dalur» – 20 let uspeha / N. A. Poponin, N. I. Lucenko, O. V. Haleckaya // Gornyj zhurnal. – 2021. – №5. – S. 36–41. – EDN DOZOIV. [in Russian].
3. *Balihin, A. V.* Mineralno-syrevaya baza urana: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. Obzor / A. V. Balihin // Kompleksnoe ispolzovanie mineralnogo syrya. – 2019. – №1 (308). – S. 36–50. – DOI 10.31643/2019/6445.05. – EDN ZAXCBV. [in Russian].
4. Geotehnologiya urana (rossijskij opyt): izdanie priurocheno k 10-letiyu Gornorudnogo diviziona Goskorporacii «Rosatom»: [monografiya / Akimova I. D., Babkin A. S., Voroncova O. M. i dr.; red. kollegiya: Solodov I. N. – glav. red., Kamnev E. N.; Gornorudnyj divizion Goskorporacii «Rosatom». – M.: KDU, Universitetskaya kniga, 2017. – 574 s. [in Russian].
5. *Poponin, N. A.* AO "Dalur": syrevaya baza, etapy stanovleniya i perspektivy razvitiya / N. A. Poponin, Yu. I. Laptev // Gornyj zhurnal. – 2016. – №10. – S. 6–12. – DOI 10.17580/gzh.2016.10.01. – EDN XCLGON. [in Russian].
6. Modelirovanie geoekologicheskih posledstvij razrabotki mestorozhdeniya urana sposobom podzemnogo vyshelachivaniya / T. S. Terovskaya, A. G. Kesler, Yu. I. Laptev [i dr.] // Razvedka i ohrana nedr. – 2021. – №2. – S. 59–65. – EDN CVAYAY. [in Russian].
7. *Ahmedova, N. M.* Environmental consequences of uranium mining by underground leaching and assessment of the environmental influence / N. M. Ahmedova, A. H. Toshnazarov, A. R. Muhammadiev // Eurasian Union of Scientists. – 2020. – № 11-7(80). – P .7–12. – DOI 10.31618/ESU.2413-9335.2020.7.80.1138. – EDN FVJHHE.
8. Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2016610552 Rossijskaya Federaciya. Modelirovanie geoekologicheskogo sostoyaniya mestorozhdenij AO "Dalur", razrabatyvaemyh sposobom podzemnogo vyshelachivaniya: № 2015661283: zayavl. 23.11.2015: opubl. 14.01.2016 / A. S. Babkin, A. D. Istomin, A. G. Kesler [i dr.]; zayavitel Akcionernoe obshestvo «Dalur». – EDN ICWMKU. [in Russian].
9. Experience in realization independent public control of radiation-hazardous facilities / A. A. Ekidin, A. V. Vasilev, M. E. Vasyanovich [et al.] // Research trajectory – human, nature, technologies. – 2023. – №1 (5). – P. 87–103. – DOI 10.56564/27825264_2023_1_87. – EDN LNXQFU. [in Russian].
10. Materialy obosnovaniya licenzii na osushestvlenie otdelnyh vidov deyatelnosti, okazyvayushih negativnoe vozdejstvie na okruzhayushuyu sredu, v sootvetstvii s zakonodatelstvom Rossijskoj

Federacii v oblasti ispolzovaniya atomnoj energii. Razmeshenie, sooruzhenie, ekspluatacionnyh istochnikov, punktov hraneniya yadernyh materialov i radioaktivnyh othodov. Akcionernoe obshestvo «Dalur». 2020 god. [Elektronnyj resurs]. – URL: https://dalur.armz.ru/ru/sotsialnaya-otvetstvennost/otsenka-vozdejstviya-na-okruzhayushchuyu-sred (data obrasheniya 02.02.2026). [in Russian].

11. Prakticheskoe rukovodstvo po izmereniyu radona i rastvorennogo radiya v prirodnyh vodah prostejshimi metodami / T. D. Ogilvi, N. A. Ogilvi, A. V. Vyrubova, M. A.Dronova; Komitet po delam geologii pri sovete ministrov SSSR. – Moskva ; – Leningrad: Gosgeolizdat, 1946. – 48 s. [in Russian].
12. Ustranenie poter i razubozhivaniya urana pri skvazhinnom podzemnom vyshelachivanii / I. N. Solodov, S. V. Polonyankina, L. Yu. Vorobeva [i dr.] // Razvedka i ohrana nedr. – 2018. – №7. – S.52–58. – EDN UUUJZR. [in Russian].
13. Prognoz, poisk, razvedka i promyshlennaya ocenka mestorozhdenij urana dlya otrabotki podzemnym vyshelachivaniem / K. G. Brovin, V. A. Grabovnikov, M. V. Shumilin, V. G. Yazikov. – Almaty: Gylym, 1997. – 384 s. [in Russian].
14. Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa. 3-e izd., pererab. i dop. T.1 / V. M. Maksimov, V. D. Babushkin; N. N. Verigin [i dr.] Pod red. V. M. Maksimova. L.: Nedra, 1979. – 512 s. [in Russian].
15. *Avazov, R. R.* Preparation of productive solutions of borenhole underground leaching for sorption of uranium / R. R. Avazov, B. H. Nurtaev, K. A. u. Temirov // Universum: technical sciences. – 2021. – №3-3(84). – P.12-14. – EDN IHYRKP.
16. TKP 17.04-48-2012 (02120). Environmental protection and nature management. Subsoil. Rules for the application of reserves classification to uranium ore deposits. – Introduced 2012-07-01. – Minsk : Ministry of Natural Resources, 2012. – 34 p. – (Technical Code of Good Practice). – Text : direct. [in Russian].