

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЕ ПРИ ЗАКРЫТИИ УРАНОВЫХ ПРОИЗВОДСТВ (НА ПРИМЕРЕ РОССИИ, СНГ И ГЕРМАНИИ)

Е.Н. Камнев¹, В.П. Карамушка¹, А.В. Селезнев¹, В.Н. Морозов², А. Хиллер³

¹ АО «ВНИПИПромтехнологии», Москва, Россия,
e-mail: Kamnev.E.N@vnipipt.ru

² Геофизический центр РАН, Москва, Россия,

³ Висмут ГмБХ, Германия

Аннотация: Обозначены основные радиационно опасные факторы (РОФ), сопровождающие закрытие урановых производств. Это гамма-облучение, радон и его дочерние продукты распада, долгоживущие альфа-излучатели, которые появляются с выбросами вентиляционных шахт при подземной добыче урана, при изливе шахтных вод в речные потоки, на отвалах забалансовых руд и при хранении хвостов от переработанных на гидрометаллургических заводах урановых руд (хвостохранилищах). Приведен расчет мощности поглощенной дозы γ -излучения для горных отвалов и хвостохранилищ, а также расчет диффузионной длины распространения радона в атмосфере. Показано экологическое состояние объектов постуранового производства и размеры загрязненных площадей на территории России и СНГ. Дан анализ результатов экологического мониторинга на 8 урановых комбинатах СНГ как на период эксплуатации, так и в постэксплуатационный период, который позволил установить основные источники радиоактивного загрязнения, их характеристики и показатели радиационного воздействия на окружающую среду. Отмечено, что в АО «ВНИПИПромтехнологии» сформирован самый большой банк данных характеристик техногенных грунтов. Использование этих данных позволило разработать методики прогнозирования физико-механических характеристик хвостовых отложений во временном периоде. Также подробно описаны рекультивационные мероприятия на территории бывшего советско-германского акционерного общества «Висмут» (ФРГ): прежде всего, работы на горных отвалах, на шламоохранилищах и на промышленных площадках. Обозначены долгосрочные задачи, центральным элементом которых является очистка шахтных вод. Отмечен 25-летний опыт реабилитационных работ «Висмут» ГмБХ, который может внести свой творческий вклад в качестве консультанта и партнера по аналогичным проектам и программам рекультивации.

Ключевые слова: радиационно опасные факторы, уран, радий, радон, рекультивационные мероприятия, горные отвалы, хвостохранилище, шахтные воды, техногенные грунты, экологический мониторинг, рекультивация территории.

Для цитирования: Камнев Е.Н., Карамушка В.П., Селезнев А.В., Морозов В.Н., Хиллер А. Экологические проблемы и их решение при закрытии урановых производств (на примере России, СНГ и Германии) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 5. – С. 26–39. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-26-39.

Ecology of uranium mine closure: problems and solutions (in terms of Russia, CIS countries and Germany)

E.N. Kamnev¹, V.P. Karamushka¹, A.V. Seleznev¹, V.N. Morozov², A. Hiller³

¹ JSC «VNIPIpromtehnologii», Moscow, Russia, e-mail: Kamnev.E.N@vnipipt.ru

² Geophysical Center of the RAS, Moscow, Russia

³ Wismut GmbH, Chemnitz, Germany

Abstract: The major radiation hazards during uranium mine closure are specified. These factors are gamma radiation, radon and its decay by-products, long living alpha emitters which appear with emissions from ventilation shafts during underground uranium mining, with mine water discharge in river flows, at low-grade ore stock piles and tailings storage facilities at hydrometallurgical uranium ore plants. The γ -radiation dose rate is calculated for waste dumps and tailings ponds together with propagation length of radon in the atmosphere. The state of ecology in the uranium post-mining areas is described, and the sizes of the polluted areas in Russia and in the CIS countries are presented. The ecological monitoring results at 8 uranium mines in the CIS countries are analyzed both during operation and in the post-operation period. The analysis reveals the main radiation sources, their characteristics and environmental impact of the exposure. It is emphasized that VNIPIpromtehnologii Institute has collected the largest data bank on man-made soil. The use of the data made it possible to develop a prediction procedure of physical and mechanical characteristics of tailings in the course of time. Furthermore, the reclamation measures undertaken in the area of the former Soviet-Germany Wismut Company, first of all, at dumps, slurry ponds and industrial sites, are described in detail. The 25 years-long experience of Wismut GmbH in reclamation is highlighted. The company can offer its contribution as a creative consultant and a partner in reclamation projects and programs.

Key words: radiation hazards, uranium, radium, radon, reclamation measures, mine dumps, tailings ponds, mine water, man-made ground, ecological monitoring, reclamation areas.

For citation: Kamnev E.N., Karamushka V.P., Seleznev A.V., Morozov V.N., Hiller A. Ecology of uranium mine closure: problems and solutions (in terms of Russia, CIS countries and Germany). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(5):26-39. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-5-0-26-39.

Радиационно опасные факторы урановых рудников

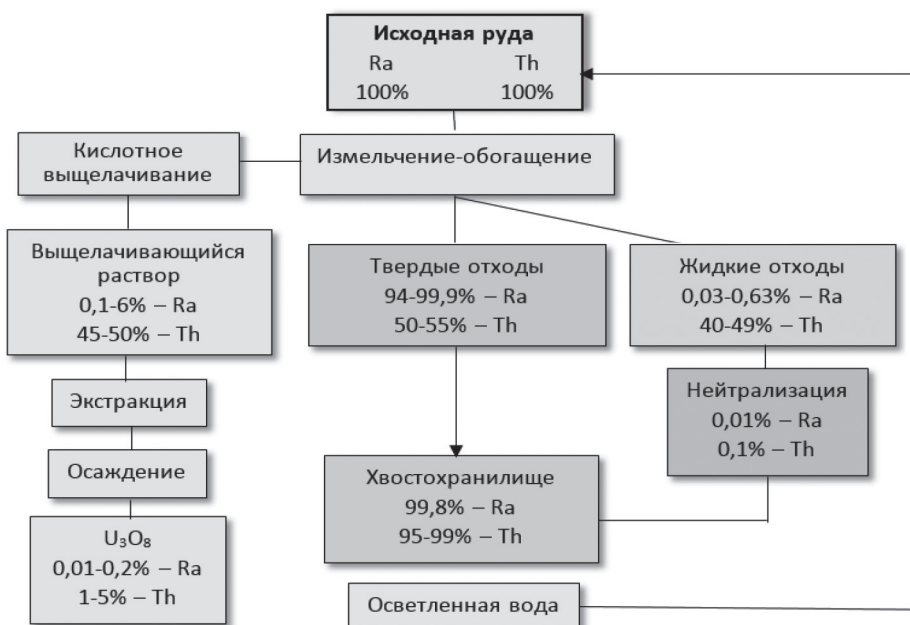
Источниками радиации и загрязнения окружающей среды при добыче и первичной переработке урановых руд являются четыре субстанции. Это выбросы вентиляционных шахт при подземной добыче урана, излив шахтных вод на земную поверхность, отвалы забалансовых руд, хвосты от переработанных на гидromеталлургических заводах урановых руд (хвостохранилища) [1].

Во всех четырех субстанциях радиационно опасными факторами (РОФ)

являются гамма-облучение, радон и его дочерние продукты распада, долгоживущие альфа-излучатели.

После извлечения урана из руд остаточное содержание его составляет от 0,001% до 0,02%. При этом содержание радия и тория остается на уровне (80–95%) их исходного равновесного содержания в рудах [2]. Баланс распределения радия и тория в технологическом процессе обогащения приведен на рисунке.

Гамма-излучение от отвалов забалансовых руд можно рассчитать аналитически [3].



Баланс распределения радия и тория по основным операциям гидрометаллургической переработки урановой руды

Баланс распределения радия и тория по основным операциям гидрометаллургической переработки урановой руды

Для плоскости с 2л-геометрией, какой является поверхность горных отвалов шахт и рудников, можно воспользоваться формулой

$$P_{\gamma} = K_{\gamma} \cdot C_{\nu}^{\text{cp}},$$

где P_{γ} — мощность поглощенной в воздухе дозы γ -излучения, мкЗв/ч; C_{ν}^{cp} — среднее содержание урана в забалансовой руде, кг/т; K_{γ} — эмпирический коэффициент, определяемый по данным радиационного обследования в условиях конкретных горнотехнических соотношений в отвальной массе, мкЗв · т/ч · кг.

При отсутствии экспериментальных данных K_{γ} можно принять равным 5,6 мкЗв · т/ч · кг [4].

Эта формула была предложена в свое время ленинградским ученым Игорем Леонидовичем Шахаевым. Им же было доказано, что с гамма-излучением горной массы следует считаться лишь при

содержанию урана в ней больше 1%. Такого содержания в шахтных отвалах никогда не бывает. Таким образом, с точки зрения дополнительного облучения персонала, работающего на отвальных полигонах, им можно пренебречь.

Подобные расчеты можно провести и для поверхности хвостохранилищ, где хранятся хвосты переработки урановых руд.

При этом в вышеозначенной формуле содержание урана C_{ν}^{cp} следует заменить на содержание в хвостах радия $C_{\text{Ra}}^{\text{cp}}$, так как радиоактивное равновесие в шламах резко сдвинуто в сторону Ra.

В ряду распада радия наиболее сильным гамма-излучателем является изотоп RaC.

Следует заметить, что по эксплуатационным регламентам пребывание персонала на поверхности хвостохранилища резко ограничено [5–7]. Поэтому

γ-излучением с этих поверхностей, как и с отвалов забалансовых руд, также можно пренебречь.

Радоновая опасность

Шахтные отвалы забалансовых руд, как и поверхность хвостохранилищ в естественном состоянии, непрерывно эмануруют с выделением в атмосферу радиоактивного газа радон [8, 9].

Радон представляет собой одноатомный инертный газ. Коэффициент диффузии радона в воздухе при 15 °С и $1,013 \cdot 10^5$ Па атмосферного давления равен $0,1 \text{ см}^2/\text{с}$. Коэффициент диффузии радона в воде при 18 °С равен $1,1 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{с}$ [4].

Для оценки расстояния, на которое распространяется радон в атмосфере за счет его диффузии, используют понятие диффузионной длины (L_d , см), характеризующей расстояние, на котором концентрация радона уменьшается за счет распада в 2,7 раза. Величина L_d определяется из соотношения:

$$L_d = \sqrt{K_d \cdot \lambda},$$

где K_d — коэффициент диффузии радона, $\text{см}^2/\text{с}$; λ — постоянная радиоактивного распада радона, с^{-1} .

Для радона L_d равна 2,2 м. Это означает, что в условиях застойного режима воздушной атмосферы он может распространяться за счет диффузии не более 20–30 м (срок жизни любого радиоактивного вещества, определяемый десятью периодами его полураспада).

Для условий горных отвалов и хвостохранилищ гораздо более существенным является конвективный перенос радона с их поверхности [9]. Согласно закону Генри, выделяемый в воздушную массу радон моментально переходит в атмосферу и может переноситься с ветром на более далекие расстояния. Но при этом его концентрация в воздухе резко уменьшается [4].

Эта величина нормируется в России как $0,74 \text{ Бк}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, в нормативных документах МАГАТЭ она равна $1,0 \text{ Бк}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$. Превышение этих значений для радона практически может наблюдаться лишь в первых десятках метров от границ отвалов и хвостохранилищ [5, 7, 10].

Отмечено, что радон достаточно хорошо задерживается некоторыми материалами, такими как силикагель, глина, резина, фосфогипс.

В качестве примера можно привести хвостохранилище АО «Алмаз» (г. Лермонтов). Для нейтрализации воздействия ранее накопленных радиоактивных отходов на окружающую среду и население одна из карт этого объекта была покрыта слоем фосфогипса, являющегося отходами переработки Кольских апатитов. Этому предшествовал комплекс детальных исследовательских работ, включающих в себя лабораторные и промышленные испытания [11].

Конвективный переход радона, выделяемого отвалами забалансовых руд, шахтными водами и хвостохранилищами в открытую атмосферу, подчиняется закону Дарси.

Согласно этому закону происходит моментальное выравнивание концентраций радона между материнской субстанцией и атмосферой. Поскольку объем последней неизмеримо выше объема материнского вещества, выделяющийся из отвалов и с поверхности хвостохранилищ, газ радон быстро рассеивается в атмосфере, достигая допустимых концентраций в $0,74 \text{ Бк}/\text{м}^3$ уже на расстоянии 50–100 м от границ указанных объектов.

Сложнее обстоит дело с дочерними короткоживущими продуктами распада (ДПР) радона. Суммарный период полураспада этих продуктов (RaA , RaB и RaC) исчисляется примерно в 30 с.

Проведенные нами расчеты выброса ДПР из вентиляционных стволов с ис-

**Характеристика радиоактивного загрязнения основных элементов окружающей среды
Характеристика радиоактивного загрязнения основных элементов окружающей среды**

Элементы окружающей среды	Радиационно-опасные факторы	Ед-ца изм.	Фоновые значения		Предельно допустимые концентрации сверх фона	Диапазон фактически зарегистрированных значений	Примечание
			среднее	характер. диапазон			
Воздух	эквивалентная равновесная концентрация дочерних продуктов радона	Бк/м ³	1,8	0,1—10,0	37*	185—260	на расстоянии 100—150 м от источника выброса
	суммарная α'-активность долгоживущих радионуклидов уранового ряда	мБк/м ³	0,01	0,001—10	12,0	4—40	на расстоянии 100—150 м от источника выброса
Вода	по содержанию Ra-226 и дочерних продуктов его распада	Бк/м ³	37	1,11—111	111**	300—500	при геолого-разведочных и горно-подготовительных работах
						3700—5500	при очистных работах
Почвы	суммарная α'-активность долгоживущих радионуклидов уранового ряда	Бк/кг	370	90—700	600—1200	10 000—50 000	в неочищенных шахтных водах
						10 000—80 000	в жидкой фазе хвостов ГМЗ
Отвалы горных пород	α-активность	Бк/кг	240	150—10 000	600—1200	1000—7400	в санитарно-защитной зоне действующих предприятий
						12	10—60
Хвосты ГМЗ	эксхалация радона с поверхности	Бк/м ² с	0,016	0,004—0,053	1,0***	1,7—30,0	на сухих пляжах хвостохранилищ
						210	
Твердые отходы	γ-активность	мкР/ч	12	10—60	20	100—1400	

* — Вне помещений. Для жилых домов — 200 Бк/м³; ** — для водоемов, для сбросных вод в расчете на их разбавление — 185 Бк/м³;

*** — норма СССР, по данным МКРЗ — 0,74 Бк/м²с

ходящей струей загрязненного воздуха показали, что на расстоянии, в среднем, 50–70 м от основания вентиляционного канала на земной поверхности образуется «лисий хвост» факела выброса.

Учитывая постоянный привнос в эту зону дополнительных ДПР, обычно в виде мелкодисперсных частиц, находиться в ней персоналу, а тем более населению, становится опасно.

И, наконец, долгоживущие альфа-излучатели, сопутствующие постэксплуатационным урановым объектам, находятся вблизи их границ в виде крупнодисперсных пылевых частиц, очистка от которых обуви персонала обязательна.

Экология постурановых производств в СНГ

Экологическое состояние объектов постуранового производства на территории СНГ (в том числе и России) характеризуется следующим образом.

Наиболее загрязненными являются территории, занятые хвостохранилищами ГМЗ, на которых было уложено 350 млн т хвостов обогащения, суммарная активность которых составляет $481 \cdot 10^{14}$ Бк, а выделяемого радона — более $148 \cdot 10^{14}$ Бк.

На территориях, нарушенных горными работами, заскладировано 4,2 млрд м³ горной массы, в том числе 3,8 млрд м³ пустой породы и около 400 млн м³ забалансовых руд [11, 12].

Проведенный анализ материалов экологического мониторинга на 8 урановых комбинатах СНГ как на период эксплуатации, так и в постэксплуатационный период позволил установить [11, 13]:

- основные источники отходов и их характеристики (табл. 1);
- показатели радиационного воздействия на окружающую среду, ориентировочные параметры изоляционных слоев из инертных грунтов, укладываемых при рекультивационных работах (табл. 2).

Приведенные данные показывают, что наиболее опасными для окружающей среды являются хвостохранилища горно-металлургических заводов и отвалы хвостов радиометрического обогащения.

В результате многолетних наблюдений на действующих и отработанных хвостохранилищах СНГ, а также уранодобывающих стран Восточной Европы в АО «ВНИПИпромтехнологии» сформирован самый большой банк данных характеристик техногенных грунтов. Использование этих данных позволило разработать методики прогнозирования физико-механических характеристик хвостовых отложений во временном периоде.

Также была разработана и применяется методика обследования законченных эксплуатацией хвостохранилищ способом динамического зондирования (пенетрация). Применение данного метода позволяет сократить время обследования, исключить облучение персонала при отборе проб монолитов из шурфов, исключить лабораторные работы [11, 12].

В АО «ВНИПИпромтехнологии» разрабатываются новые прогрессивные технологии укрепления грунтов в особо сложных условиях [88, 14]. Примером могут служить проектные решения (регламент) по применению технологии струйной цементации грунтов, разработанные для объекта «Минкуш» (Республика Киргизия). Эта технология позволяет формировать в слабоустойчивых грунтах зоны различной формы и размера со значительно более высокими механическими параметрами, при этом обладающие меньшей водопроницаемостью. После промышленной апробации на указанном объекте применение данной технологии позволит снизить техногенные и природные риски на период выполнения рекультивационных работ

Таблица 2

Показатели радиационного воздействия на окружающую среду, ориентировочные параметры изоляционных слоев из инертных грунтов
Показатели радиационного воздействия на окружающую среду, ориентировочные параметры изоляционных слоев из инертных грунтов

Показатели радиационного воздействия	Отвалы пустых (вмещающих) пород	Отвалы хвостов радиометрического обогащения	Отвалы забалансовых руд	Отвалы хвостов кучного выщелачивания	Хвостохранилища ГМЗ
1. Содержание урана, %	0,001 – 0,006	0,010 – 0,020	0,010 – 0,030	0,008 – 0,015	0,001 – 0,011
2. Суммарная α -активность пород, Бк/кг	$0,4 \cdot 10^3 \pm 4,4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3 \pm 10 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3 \pm 12,9 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3 \pm 12,9 \cdot 10^3$	$1,03 \cdot 10^3 \pm 4,9 \cdot 10^3$
3. γ -активность, мкР/ч	20 – 120	40 – 250	50 – 200	50 – 200	100 – 140 500
4. Гранулометрический состав, мм	горная масса забойной крупности – 400	25 – 300	горная масса забойной крупности – 400	горная масса забойной крупности – 400	измельченная масса – 0,15 – 0,043
5. Плотность потока радона с поверхности отходов, Бк/м ² с	0,034 – 0,094	0,08 – 0,8	0,12 – 1,2	0,12 – 1,2	0,2 – 30
6. Содержание 226-Ra в породах, Бк/кг	37 – 220	300 – 500	300 – 1700	300 – 1700	$\frac{1100 - 27\ 800}{5000}$
7. Ориентировочные параметры рекультивационного слоя инертных пород, необходимого для изоляции отходов от окружающей среды, м	1,0 – 1,5	1,5 – 2,0	1,2 – 1,6	1,2 – 1,6	2,5 – 3,0
8. Допустимое остаточное радоновыделение на ликвидируемых объектах	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

* На хвостохранилищах противорадоновый слой толщиной не менее 0,5 м (глина, суглинок и другие, в том числе, техногенные) уточняется экспериментами или расчетным путем)

и обеспечить необходимую расчетную устойчивость оползневых участков [15].

Рекультивационные работы на урановых объектах ФРГ

Небезынтересно сравнение состояния окружающей среды и применяемых технологий в местах отработанных урановых объектов на территории России и Германии (рудники СГАО «Висмут»).

В период с 1946 по 1990 г. СГАО «Висмут» являлось крупнейшим поставщиком урана для Советского Союза. Ежегодное производство урана составляло до 7100 т или порядка 20–30% всего мирового производства урана.

Во время прекращения производства СГАО «Висмут» имело в своем составе:

- 7 производственных комплексов, более 1000 объектов;
- 5 подземных рудников, 1 открытой карьер;
- 2 обогатительных предприятия, 10 хвостохранилищ с содержанием более 160 млн м³ хвостов;
- 3700 га производственных площадей с радиоактивным заражением;
- более 60 горных отвалов, содержащих 325 млн м³ горной породы.

Производство было прекращено ввиду его нерентабельности, что совпало с процессом воссоединения Германии. Правительство ФРГ приняло на себя ответственность за преодоление огромного наследия СГАО «Висмут». С этой целью в 1991 г. было образовано общество с ограниченной ответственностью «Висмут ГмбХ». При первоначальной оценке стоимости рекультивации объекта в бюджете ФРГ было запланировано выделить на эти работы около 13 млрд немецких марок [16].

Первые работы по рекультивации были начаты уже в 1991 г. в виде подготовки вывода из эксплуатации подземных сооружений. В настоящее время

действует Горный закон ФРГ, в котором четко сформулированы требования, предъявляемые к порядку закрытия рудников. Решения о затоплении рудников были достаточно быстро приняты по результатам рассмотрения различных вариантов в отношении всех объектов, кроме Кенигштайна [17]. Затем была начата подготовка к затоплению путем удаления из затопляемого пространства всех не совместимых с водой материалов, а также путем сооружения водонепроницаемых перемычек для управления процессами затопления и создания необходимых насосных мощностей, равно как и создания определенных водоотводных систем. По окончании этих работ последовало контролируемое затопление подземных горных выработок. При этом в районе Ауэ (рудник Шлема-Альберода) периодически приходилось сокращать приток воды для затопления с помощью откачки излишних объемов, чтобы можно было противостоять возможным сейсмическим событиям [18, 19]. В Кенигштайне к настоящему времени удалось произвести лишь частичное затопление, поскольку в случае полного затопления рудника избыточное поступление воды могло привести к поступлению ее в грунтовые воды, которые питают население окрестности питьевой водой.

Гораздо более комплексными представляются требования к рекультивации горных отвалов [20]. При этом «Висмут ГмбХ» руководствовался двумя принципиальными вариантами: 1) «рекультивация на месте» и 2) полное удаление отвалов с их захоронением в заранее установленные зоны. Вариант «рекультивация на месте» применяется, прежде всего, в отношении химически стабильного материала отвалов, когда бывает достаточно произвести изоляцию для существенного сокращения воздействия на окружающую среду.

Возведение перекрытия на отвалах ведет к сокращению инфильтрации осадков и выделения радона и обеспечивает надежную консервацию. Определение размеров систем перекрытия в рамках процесса оптимизации проводилось с привлечением различных инженерно-технических и научных подразделений, а также с учетом возникающих затрат.

Создание перекрытия включает в себя несколько этапов. Первоначально проводится сглаживание откосов, чтобы обеспечить устойчивость и самого тела откоса, и наносимого перекрытия. Перекрытие наносится слоями мощностью по 45–50 см и уплотняется переездами гусеничными ходовыми средствами. Затем наносится биологически культурный слой (верхний слой почвы, компост) и производится первичное озеленение травяным покровом. В заключение обустриваются дорожки и дренажные канавы. В перспективе требуется проводить уход за растительностью на поверхности отвалов. При этом необходимо регулярно окашивать травяной покров или производить посадку кустарников и деревьев.

Полное удаление отвалов было осуществлено, прежде всего, в районе Роннебурга, где из-за высокого содержания пирита отвальный материал склонен был к окислению и образованию сернистой кислоты. Для размещения отвальной массы с учетом местных условий пришлось воспользоваться карьером Лихтенберг. Наиболее сильно зараженные массы были помещены на наибольшую глубину карьера, чтобы можно было обеспечить долговременное хранение ниже уровня грунтовых вод (с отсечкой доступа воздуха). Путем внесения известняка проводилось целенаправленное сокращение кислотообразующего потенциала отвальных масс. По завершении этих работ здесь также было сделано комплексное перекрытие

отвалов. Таким способом было захоронено 13 отвалов с общим объемом более 200 млн м³. При этом использовалась специальная транспортно-погрузочная техника, которая позволила завершить работы в относительно короткие сроки.

Наибольшую трудность представляла собой рекультивация отстойников для остатков обогатительного производства [21]. Здесь залегал материал с высокой удельной радиоактивностью (содержание радия) и с наличием тяжелых металлов, в том числе мышьяка (в отдельных случаях). Плюс к этому здесь присутствовали различные химикаты, применяемые в обогатительных процессах. Исходные руды и технология их переработки требовали мелкого помола материала, в результате чего, а также вследствие содержания воды данный материал отличался низкой механической стабильностью.

Ранее в обращении с таким мелкодисперсным шламом не было накоплено достаточного опыта. Кроме этого, не в каждом случае имела место долгосрочная геотехническая стабильность плотин; в сбрасываемых и в просачивающихся водах обнаруживалась высокая степень минерализации и содержания вредных веществ. После выполнения на шламохранилищах обширных неотложных мероприятий проводились многолетние исследования с целью выбора стратегии рекультивации.

По результатам интенсивных дискуссий между специалистами «Висмут ГмБХ», проектировщиками, государственными службами и экспертами был выбран в качестве предпочтительного вариант сухого захоронения на месте (*in situ*). Вначале проводилось удаление свободных вод, затем создавался рабочий уровень с достаточной нагрузкой за счет нанесения георешеток и каменного (отвального) материала на нестабильную поверхность «хвостов».

После этого производилось опускание дренажных фитилей в водонасыщенные шламы. В результате создания промежуточного перекрытия (нагрузочной насыпки) усиливался процесс дренажа «хвостов». Одновременно с этим производилось оконтуривание плотин. Возникающие в зонах бассейна просадки компенсировались дальнейшим внесением материала. В заключение возводилось окончательное перекрытие с созданием водоотводных систем и озеленением. По аналогии с отвалами осуществлялись долгосрочные меры по уходу за данными объектами. Ввиду потенциально высокой угрозы со стороны шламохранилищ здесь сооружались особо мощные и сложноструктурированные многослойные перекрытия.

Разработка и оптимизация оборудования и технологии для водоочистки постоянно находятся в центре внимания сегодняшней фирмы «Висмут ГмбХ». Водоочистке подвергаются рудничные воды из затопленных шахт, свободные воды из шламохранилищ, просачивающиеся воды из отвалов и промышленных шламохранилищ [22]. При определении размеров сооружений приходится учитывать в динамике объем поступающих вод, их химизм. Вначале для выделения урана в качестве стандартной технологии использовалось известковое осаждение, поскольку этот метод широко применялся в мире при обогащении руд тяжелых металлов. При использовании хлоридов бария и железа, а также перманганата калия можно выделять радий, мышьяк, железо и марганец. По соображениям себестоимости были опробованы и альтернативные способы на основе пассивно-биологических установок, ионообменников и сорбционных колонн.

В настоящее время на всех объектах проводятся исследования с целью оптимизации имеющегося оборудования,

а также для обеспечения долгосрочной эксплуатации при максимальной надежности и минимальных затратах на обработку.

К числу удачно завершенных международных проектов с участием «Висмут ГмбХ» относятся рекультивационные работы на объектах Силламяэ (Эстония), Майлиу Су (Кыргызстан), Печ (Венгрия), Жировски Врх (Словения), Китве (Замбия), Усть-Каменногоorsk (Казахстан), Янгибад/Чаркесар (Узбекистан) и Дегмай/Табошар (Таджикистан). Особо следует упомянуть разработку для предприятия «Алмаз» в г. Лермонтове концепции рекультивации, над которой совместно трудились эксперты «ВНИИпромтехнологии» и «Висмут ГмбХ» в период 2004–2006 гг.

Данный проект, реализованный при финансировании со стороны ЕС, продемонстрировал потенциал успешного сотрудничества и получил по его завершении высокую оценку со стороны инвестора. В данный момент немецкие и российские эксперты работают над объектами «Минкуш» и «Табошар». Вполне возможно, что и здесь обнаружатся перспективы для сотрудничества [23, 24].

Итак, по результатам рекультивационных работ в Германии можно отметить следующее:

Рекультивация создает предпосылки для успешного возвращения к жизни рекультивированных территорий. Удалось распродать или сдать в аренду 45% первоначально использованных горной промышленностью площадей.

К концу 2015 г. объем рекультивации наследия урановой горной промышленности в Восточной Германии был успешно выполнен более чем на 85%. В общей сложности до окончания рекультивации будет израсходовано около 8 млрд евро. Полностью задачи рекультивации будут выполнены в 2028 г.

Закключение

Опыт рекультивационных работ на бывших урановых объектах в Германии (при существенном финансировании со стороны государства) показывает на техническую возможность и реальную осуществимость многих экологических задач. В России и странах СНГ подобные работы также получают все большее

распространение. Разработанные в России технологии, опыт работ в различных климатических зонах и базы данных по законченным эксплуатацией объектам СНГ позволяют снизить затраты на проектно-изыскательские и научно-исследовательские работы, оптимизировать объемы рекультивации с обеспечением допустимых рисков [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Осипов В. И.* Геоэкология — международная наука об экологических проблемах геосфер // Геоэкология. — 1993. — № 1. — С. 4–18.
2. *Крышев И. И., Курындина Л. А., Линге И. И.* Оценка ущерба окружающей среде при использовании атомной энергии // Атомная энергия. — 2014. — Т. 117. — № 3. — С. 159–164.
3. *Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующих излучений и безопасного обращения с источниками излучения* // МАГАТЭ. Серия изданий по безопасности № 115. Вена. 1997.
4. *Павлов И. В., Покровский С. С., Камнев Е. Н.* Способы обеспечения радиационной безопасности при разведке и добыче урановых руд. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 256 с.
5. *Принципы ограничения выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду* // МАГАТЭ. Серия изданий по безопасности № 77. Вена. 1989.
6. *Технический документ Всемирного банка № 139.* Справочное пособие по экологической оценке. — Вашингтон. 1991.
7. Санитарно-защитные зоны и зоны наблюдения радиационных объектов. Условия эксплуатации и обоснование границ. Санитарные правила (СП СЗЗ и ЗН-07) СП 2.6.1.2216-07.
8. *Камнев Е. Н., Калакуцкий А. В.* Работы АО «ВНИПИпромтехнологии» в области экологии горного дела // Вестник РАЕН. — 2018. — Т. 18. — № 1. — С. 6–7.
9. *Камнев Е. Н.* Определение радонового дебита и воздухопотребности урановых рудников. Решение проблемы «радон в жилищах» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № S7. — С. 83–92.
10. *Иванов Е. А., Шаров Д. А., Демьяненко И. О., Шарафутдинов Р. Б., Курындин А. В.* О некоторых проблемах обращения с промышленными отходами, содержащими техногенные радионуклиды // Ядерная и радиационная безопасность. — 2019. — № 3 (93). — С. 3–14.
11. *Карамушка В. П., Камнев Е. Н., Кузин Р. Е.* Рекультивация объектов добычи и переработки урановых руд. — М.: Атомная энергия, 2014. — 182 с.
12. *Мязин В. П., Шекиладзе В. Т.* Разработка природоохранных мероприятий по рекультивации хвостохранилищ с целью снижения загрязнения территории Забайкалья отходами горно-перерабатывающего комплекса // Вестник ЧитГУ. — 2013. — № 06(97). — С. 30–38.
13. *Крышев И. И., Сазыкин Т. Г., Крышев А. И., Бобошко В. И., Францев В. Н.* Влияние радиоактивных выбросов уранодобывающего и перерабатывающего производств ОАО «ППГХО» на население и биоту // Атомная энергия. — 2012. — Т. 113. — № 3. — С. 173–177.
14. *Волков Ю. И., Изотов А. А., Пономаренко Ю. В.* Противофильтрационные завесы в промышленности / Под ред. Ю.И. Волкова. — М.: Из-во «Руда и металлы», 2014. — 303 с.

15. Иоффе А. М., Селезнев А. В., Величко Д. В. Геомеханическое обоснование параметров бетонного крепления стволов с применением методов численного моделирования / Материалы VI Международной научно-технической конференции «Решение экологических и технологических проблем горного производства на территории России, ближнего и дальнего зарубежья». — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2019. — С. 43—52.

16. Манфред Хаген «Висмут». Программа экологической рекультивации. Современное состояние рекультивации на бывших производственных объектах уранодобывающего предприятия «Висмут» / Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий: материалы Международной научно-практической конференции. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2016. — С. 98—103.

17. Metschies T., Jenk U., Paul M. Flooding of Königstein mine — Status update, UMREG-meeting, Bessines-sur-Gartempe/Frankreich, 16. bis 18. Oktober 2017.

18. Schmidt P., Regner J., Schramm Ch. Radiological aspects of mine closure and site remediation at the wismut site of Schlema-Alberoda, Tagung mine closure 2018, Leipzig, 3. Bis 7. September 2018.

19. Wallner O. Aktuelle Erkenntnisse zur flutungsinduzierten Seismizität aus dem Umfeld der Gangerzgrube Schlema-Alberoda, 17. Altbergbau-Kolloquium, Freiberg, 16. bis 18. November 2017.

20. Paul M. Sanierung der Halden und des Tagebaus Lichtenberg im Ronneburger Uranbergbaurevier, GAB Altlastensymposium, Nürnberg, 5./6. Juli 2017.

21. Barnekow U., Merkel G. The Wismut uranium tailings remediation project — Progress achieved with respect to diversifying legal requirements, Tagung Mine Closure 2018, Leipzig, 3. bis 7. September 2018.

22. Hiller A., Kreyßig E. The Wismut information management in context of legacy management tasks, Tagung Mine Closure 2018, Leipzig, 3. bis 7. September 2018.

23. Paul M., Barnekow U., Dullies F., Hiller A., Metschies T., Schmidt P. Innovationstätigkeit und Langzeiterfahrungen bei der Sanierung des deutschen Uranbergbaus // Tagung WISSYM 2019, Chemnitz, 10./11. Oktober 2019.

24. Хиллер А. Рекультивация уранодобывающих центров Саксонии и Тюрингии — от внепланового закрытия до использования накопленного опыта / Проблемы и решения в экологии горного дела: материалы Международной научно-практической конференции. — М.: ВНИПИпромтехнологии, 2017. — С. 49—56. **МАБ**

REFERENCES

1. Osipov V. I. Geoecology — the international science of the environmental problems of the geospheres. *Geoekologiya*. 1993, no 1, pp. 4—18. [In Russ].

2. Kryshev I. I., Kuryndina L. A., Linge I. I. Environmental damage assessment using atomic energy. *Atomnaya energiya*. 2014. Vol. 117, no 3, pp. 159—164. [In Russ].

3. International basic safety standards for security against ionizing radiation and safe handling of radiation sources. *MAGATE. Seriya izdaniy po bezopasnosti № 115* [IAEA. Series of security publications No. 115], Vena, 1997. [In Russ].

4. Pavlov I. V., Pokrovskiy S. S., Kamnev E. N. *Sposoby obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti pri razvedke i dobyche uranovykh rud* [Ways of ensuring radiation safety in the exploration and mining of uranium ores], Moscow, Energoatomizdat, 1994, 256 p.

5. Principles of limiting the release of radioactive substances into the environment. *MAGATE. Seriya izdaniy po bezopasnosti № 77* [IAEA. Series of security publications No. 77], Vena, 1989. [In Russ].

6. *Tekhnicheskii dokument Vsemirnogo banka № 139. Spravochnoe posobie po ekologicheskoy otsenke* [World Bank Technical Document No 139. Environmental Assessment Reference Guide], Washington. 1991.

7. Sanitarno-zashchitnye zony i zony nablyudeniya radiatsionnykh ob"ektov. Usloviya ekspluatatsii i obosnovanie granits. Sanitarnye pravila (SP SZZ i ZN-07) SP 2.6.1.2216-07 [Sanitary protection zones for monitoring radiation objects. Operating conditions and justification of borders (SP SZZ and ZN-07). Sanitary rules SP 2.6.1.2216-07].

8. Kamnev E. N., Kalakutskiy A. V. The work of JSC VNIPIpromtekhologii in the field of mining ecology. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk*. 2018. vol. 18, no 1, pp. 6–7. [In Russ].

9. Kamnev E. N. Determination of radon flow rate and air demand of uranium mines. The solution of the problem of «radon in the dwelling». *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2015, no S7, pp. 83–92. [In Russ].

10. Ivanov E. A., Sharov D. A., Dem'yanenko I. O., Sharafutdinov R. B., Kuryndin A. V. About some issues of handling industrial waste, containing technogenic radionuclides. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost'*. 2019, no 3 (93), pp. 3–14. [In Russ].

11. Karamushka V. P., Kamnev E. N., Kuzin R. E. *Rekul'tivatsiya ob"ektov dobychi i pererabotki uranovykh rud* [Reclamation of production facilities and processing of uranium ores], Moscow, Atomnaya energiya, 2014, 182 p.

12. Myazin V. P., Shekiladze V. T. Development of environmental measures for the rehabilitation of tailings ponds in order to reduce the pollution of Transbaikalia by waste from the mining and processing complex. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2013, no 06(97), pp. 30–38. [In Russ].

13. Kryshev I. I., Sazykina T. G., Kryshev A. I., Boboshko V. I., Frantsev V. N. The effect of radioactive emissions of uranium mining and processing industries of JSC PIMCU on the population and biota. *Atomnaya Energiya*. 2012. vol. 113, no 3, pp. 173–177. [In Russ].

14. Volkov Yu. I., Izotov A. A., Ponomarenko Yu. V. Protivofil'tratsionnye zavesy v promyshlennosti [Impervious filters in industry], Moscow, Iz-vo «Ruda i metally», 2014, 303 p.

15. Ioffe A. M., Seleznev A. V., Velichko D. V. Geomechanical substantiation of concrete fastening parameters of shafts using numerical modeling methods. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Reshenie ekologicheskikh i tekhnologicheskikh problem gornogo proizvodstva na territorii Rossii, blizhnego i dal'nego zarubezh'ya»* [Materials of VI International Scientific and Technical Conference «Solving Environmental and Technological Problems of Mining in Russia, Near and Far Abroad»], Moscow, VNIPIpromtekhologii, 2019, pp. 43–52. [In Russ]

16. Manfred Khagen Environmental Remediation Program. The current state of reclamation at former production facilities of the Bismuth uranium mining enterprise. *Filosofiya obrashcheniya s radioaktivnymi otkhodami: plyusy i minusy sushchestvuyushchikh tekhnologiy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Philosophy of Radioactive Waste Management: Pros and Cons of Existing Technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference], Moscow, VNIPIpromtekhologii, 2016, pp. 98–103.

17. Metschies T., Jenk U., Paul M. *Flooding of Königstein mine – Status update*, UMREG-meeting, Bessines-sur-Gartempe/Frankreich, 16. bis 18. Oktober 2017.

18. Schmidt P., Regner J., Schramm Ch. *Radiological aspects of mine closure and site remediation at the wismut site of Schlema-Alberoda*, Tagung mine closure 2018, Leipzig, 3. Bis 7. September 2018.

19. Wallner O. *Aktuelle Erkenntnisse zur flutungsinduzierten seimizität aus dem umfeld der gangerzgrube Schlema-Alberoda*, 17. Altbergbau-Kolloquium, Freiberg, 16. bis 18. November 2017.

20. Paul M. Sanierung der Halden und des Tagebaus Lichtenberg im Ronneburger Uranbergbaurevier, GAB Altlastensymposium, Nürnberg, 5./6. Juli 2017.

21. Barnekow U., Merkel G. *The Wismut uranium tailings remediation project – Progress achieved with respect to diversifying legal requirements*, Tagung Mine Closure 2018, Leipzig, 3. bis 7. September 2018.

22. Hiller A., Kreyßig E. *The Wismut information management in context of legacy management tasks*, Tagung Mine Closure 2018, Leipzig, 3. bis 7. September 2018.

23. Paul M., Barnekow U., Dullies F., Hiller A., Metschies T., Schmidt P. *Innovationstätigkeit und Langzeiterfahrungen bei der Sanierung des deutschen Uranbergbaus*. Tagung WISSYM 2019, Chemnitz, 10./11. Oktober 2019.

24. Hiller A. Reclamation of the uranium mining centers of Saxony and Thuringia – from unscheduled closure to the use of accumulated experience. *Problemy i resheniya v ekologii gornogo dela: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Problems and Solutions in Mining Ecology: Materials of the International Scientific and Practical Conference], Moscow, VNIPIpromtekhnologii, 2017, pp. 49–56. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Камнев Евгений Николаевич¹ — д-р геол.-минерал. наук, профессор, ученый секретарь, e-mail: Kamnev.E.N@vnipt.ru, Карамушка Владимир Петрович¹ — канд. техн. наук, главный эксперт; эксперт МАГАТЭ,

Селезнев Александр Владимирович¹ — канд. техн. наук, начальник отдела,

Морозов Владислав Николаевич — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Геофизический центр РАН,

Аксель Хиллер — дипломированный геолог, руководитель геологического архива департамента инжиниринга и радиационной безопасности, «Висмут» ГмБХ (Германия), 09117 Chemnitz, e-mail: a.hiller@wismut.de,

¹ АО «ВНИПИпромтехнологии».

Для контактов: Камнев Е.Н., e-mail: Kamnev.E.N@vnipt.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

E.N. Kamnev¹, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), Professor, Scientific Secretary, e-mail: Kamnev.E.N@vnipt.ru,

V.P. Karamushka¹, Cand. Sci. (Eng.), Chief Expert; AEA Expert,

A.V. Seleznev¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department,

V.N. Morozov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Geophysical Center of Russian Academy of Sciences,

119296, Moscow, Russia,

Axel Hiller, Certified Geologist, Head of the Geological Archive of the Department of Engineering for Radiation Safety,

Wismut GmbH, 09117, Chemnitz, Germany,

e-mail: a.hiller@wismut.de,

¹ JSC «VNIPIpromtekhnologii», 115409, Moscow, Russia.

Corresponding author: E.N. Kamnev,

e-mail: Kamnev.E.N@vnipt.ru.

Получена редакцией 17.12.2019; получена после рецензии 04.03.2020; принята к печати 20.04.2020.

Received by the editors 17.12.2019; received after the review 04.03.2020; accepted for printing 20.04.2020.

