

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА РАДИАЦИОННЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ ОСВОЕНИЯ РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТОМТОР

*На примере редкометалльного месторождения Томтор в карбонатитах рассмотрен вариант возможной прогнозной оценки радиационных последствий освоения месторождения с повышенным содержанием естественных радионуклидов (ЕРН) в рудах: класса месторождения по радиационной опасности, добавки экспозиционной дозы к радиационному фону за счет рудного керна при геологоразведочных работах, уровня эквивалентной дозы персонала при открытой добыче, класса радиационной опасности продуктов и отходов гидрометаллургии. **Ключевые слова:** оценка радиационных последствий, месторождения редких элементов.*

Rossman G.I., Bakhur A.E., Petrova N.V. (VIMS)

FORECAST EVALUATION OF THE RADIOLOGICAL CONSEQUENCES DEVELOPMENT RARE METAL DEPOSIT TOMTOR

*On an example of rare metal deposit in carbonatites Tomtor considered prognostic assessment procedure radiological consequences of the field development non-uranium minerals with a high content in ores natural radionuclides: class field radiation hazard, additive exposure dose to background radiation due to ore prospecting works at the core, the equivalent dose level personnel in open-pit mining, radiation hazard class products and wastes hydrometallurgy. This article is intended for professionals that make environmental and economic sections of the feasibility study of conditions non-uranium deposits of mineral raw materials with high content of natural radionuclides in ores, concentrates, products and waste enrichment and hydrometallurgical processing. **Key words:** assessment of radiation consequences, the deposit of rare elements.*

Прогнозная оценка радиационных последствий освоения месторождений нерадиоактивного минерального сырья нередко является острой проблемой при составлении экологических разделов проектных документов. В настоящей статье рассмотрен вариант выполнения такой оценки на примере редкометалльного месторождения Томтор в карбонатитах, с использованием известных опубликованных данных о содержаниях естественных радиоактивных элементов (ЕРН) в рудах.

Месторождение находится на территории Республика Саха (Якутия) в 300 км от Северного Ледовитого океана, в зоне многолетнемерзлых пород вдали от населенных пунктов. Оно представляет собой совокупность ксено-тим-монацит-пирохлоровых россыпей, связанных с переотложенной корой выветривания карбонатитов, характеризующейся склоново-

озерными отложениями, которые перекрыты угленосными породами основания пермской континентальной толщи. Руды сцементированы озерными хемогенными алюминий-фосфорными осадками. Рудовмещающая толща и пермские отложения запечатаны морскими отложениями юры, которые перекрыты плащом четвертичных отложений [9].

По другим представлениям месторождение связано с эпигенетически измененной латеритной корой выветривания карбонатитов [3].

Мощность рудовмещающего пласта ~35 м.

Месторождение уникально по запасам и концентрации Nb, Sc и редкоземельных элементов. Руды содержат уран и торий. Наиболее богатым участком месторождения Томтор является участок Буранный. В рудах этого участка содержание U колеблется от 0,0018 до 0,0892 % (среднее ~0,0092 %), а содержание Th — от 0,019 до 0,304 % (среднее 0,11 %) [9]. Коэффициент эманирования в рудах по Rn — 24,7 %, по Tn — 16,8 % (табл. 1). Коэффициент радиоактивного равновесия (KPP) ^{238}U в рудах составляет ~0,53.

По данным [1] содержание эквивалентного ^{238}U варьирует от 40 до 61 г/т, эквивалентного ^{232}Th — от 1630 до 1810 г/т, т.е. содержания ^{238}U , эквивалентного по ^{226}Ra , примерно в 2 раза ниже содержания валового U, а содержание Th примерно в 1,5 раза выше приведенных в статье [9]. Удельная активность ^{226}Ra колеблется от 500 до 800 Бк/кг, составляя в среднем 630 Бк/кг.

Для оценки радиационного воздействия на персонал при горнодобывающих работах необходимо данные табл. 1 перевести в единую систему размерности — единицы активности (удельные активности радионуклидов — УА, Бк/кг). Для этого используем справочные коэффициенты (физические константы) перехода от единиц массовой концентрации радионуклидов к единицам активности [7].

В частности, 1 г ^{238}U имеет активность $1,24 \cdot 10^4$ Бк, а 1 г ^{232}Th — $4,1 \cdot 10^3$ Бк, при этом в состоянии радиоактивного равновесия все последующие дочерние продукты распада имеют такую же активность, как и материнские ^{238}U и ^{232}Th .

Так, удельная активность 0,0092 % U составляет $0,092 \text{ г/кг} \times 1,24 \cdot 10^4 \text{ Бк/г} = 1140 \text{ Бк/кг}$, а удельная активность 0,11% Th будет $1,1 \text{ г/кг} \times 4,1 \cdot 10^3 \text{ Бк/г} = 4510 \text{ Бк/кг}$ (табл. 2).

Вклад ^{235}U в общую активность природного U составляет менее 5 % и не учитывается нами в последующих расчетах.

Таблица 1
Характеристика естественных радионуклидов в рудах участка Буранный месторождения Томтор

Источник информации	Средние содержания ЕРН					Характеристики ЕРН		
	U, %	Th, %	²³⁸ U экв., г/т*	²³² Th экв., г/т*	²²⁶ Ra, Бк/кг	коэффициент радиоактивного равновесия (KPP)	коэффициент эманирования, %	
							Rn	Tn
[9]	0,0092	0,11				²²⁶ Ra/ ²³⁸ U 0,53 ²²⁸ Ra/ ²³² Th 1,0	24,7	16,8
[1]			49,7	1712	630			

*Средние значения, рассчитанные через активности ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{228}Ac , ^{212}Pb при условии их нахождения в состоянии векового равновесия с родоначальниками радиоактивных рядов.

Для участка Буранный требуется оценить:
радиационную опасность по данным о содержании радионуклидов в рудах;

радиационное загрязнение земной поверхности по данным геологоразведочных буровых работ;

прогнозный радиационный ущерб персоналу и окружающей среде (ОС) при отработке участка проектируемым карьером разведочно-эксплуатационного предприятия (РЭП);

прогнозный радиационный ущерб персоналу и ОС при гидрометаллургической переработке концентрата.

Оценка радиационной опасности месторождения по данным о содержании радионуклидов в рудах проводится по значению критериев $A_{эфф}$ и $Th_{экр}$ [8, § 1.2.5].

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K = 630 + 1,31 \times 4510 = 6538,1;$$

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,31A_{Th} + 0,085A_K = YA \cdot U \cdot KPP \cdot U + 1,31A_{Th} + 0,085A_K = 1140 \times 0,53 + 1,31 \times 4510 = 6512,3.$$

Поскольку содержания калия незначительны, членом уравнения A_K пренебрегаем.

Расхождения между двумя вариантами оценки $A_{эфф}$ незначительны и вызваны аналитическими погрешностями, округлением при расчетах, расчетом по осредненным данным, погрешностями пересчетов.

Следовательно, по критерию $A_{эфф}$ участок Буранный месторождения определяется как особо радиационно опасный, поскольку $A_{эфф} > 3500$ Бк/кг.

Оценим радиационную опасность руд участка по критерию $Th_{экр}$, опираясь на [6, § 1.2.5], исходя из соотношения кларков $Th:U = 4,1:1$ как для условий равновесного сочетания ЕРН с дочерними продуктами, так и при его отсутствии:

$$Th_{экр,1} = 0,01 (4,1 \times 98\,400 \text{ Бк/г} \times 0,0092 \% + 1,0 \times 24\,600 \text{ Бк/г} \times 0,11 \%) = 64,18 \text{ Бк/г},$$

где 98 400 и 24 600 Бк/г — активность соответственно 1 г ^{238}U и 1 г ^{232}Th при учете их равновесия со своими дочерними продуктами распада (ДПР).

Определяем значимость величины $Th_{экр,1}$ по значению 428 Бк/г, соответствующему единице $Th_{экр}$ для условий равновесного сочетания ^{238}U и ^{232}Th со своими дочерними продуктами при соотношении $Th:U = 4,1:1$; $Th_{экр,1} = 64,18 \text{ Бк/г} : 428 \text{ Бк/г} = 0,15$.

$$Th_{экр,2} = 0,01 (4,1 \times 12\,400 \text{ Бк/г} \times 0,0092 \% + 1,0 \times 4100 \text{ Бк/г} \times 0,11 \%) = 9,19 \text{ Бк/г},$$

где 12 400 и 4100 Бк/г — активность соответственно 1 г ^{238}U и 1 г ^{232}Th без учета их ДПР.

Определяем значимость величины $Th_{экр,2}$ по значению 54,94 Бк/г, соответствующему единице $Th_{экр}$ для условий отсутствия равновесного сочетания ^{238}U и ^{232}Th со своими дочерними продуктами при соотношении $Th:U = 4,1:1$; $Th_{экр,2} = 9,19 \text{ Бк/г} : 54,94 \text{ Бк/г} = 0,1679$ (~0,17).

Таким образом, по среднему значению критерия $Th_{экр} = 0,16$ участок Буранный месторождения определяется также как радиационно опасный.

Оценка радиационного загрязнения земной поверхности участка Буранный при геологоразведочных работах. Месторождение разведывалось в зимний период скважинами колонкового бурения диаметром ~90 мм. На площади ~1 км² пробурено около 350 скважин. Выход

Таблица 2
Удельные активности ЕРН в рудах участка Буранный месторождения Томтор

Источник информации	Удельная активность, Бк/кг		
	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra
[9]	1140	4510	
[1]			630

керна ~90 % (0,9). Керна, в том числе рудный, не убранный в кернохранилище, а оставлен у скважин, что и обусловило загрязнение территории. Средняя глубина скважин 70 м. Средняя мощность рудного пласта 35 м.

Принимаем:

значения средних активностей U и Th в рудах в соответствии с табл. 2: U — 1140 Бк/кг, Th — 4510 Бк/кг; объемную массу руды — 2,2 т/м³.

Определяем массу рудного керна M_p , поднятого одной скважиной:

$$M_p = 35 \text{ м} \times 0,09^2 \text{ м}^2 : 4\pi \times 2,2 \text{ т/м}^3 \times 0,9 = 440 \text{ кг/скв.}$$

В качестве фона берем значения удельной радиоактивности типичных почв (Моисеев и др., 1990). Максимальные значения удельной активности почв (фона-Ф) составляют по ^{238}U — 52 Бк/кг, по ^{232}Th — 48 Бк/кг, минимальные — соответственно 11 и 7,5 Бк/кг [8, § 1.2.6.2]. Следовательно, удельная активность рудного керна (табл. 2) будет превышать предполагаемую удельную активность почв по U в 21,9—103,6 раза, по Th в 93,9—601,3 раза.

У каждой скважины из складированного керна постоянно будет выделяться ^{222}Rn (радон) удельной активностью $1140 \times 0,53 \times 0,247 = 149,2$ Бк/кг (оценка по ^{226}Ra дает 155,6 Бк/кг) и ^{220}Rn (торон Tn) удельной активностью $4510 \times 0,168 = 757,7$ Бк/кг.

Зная массу неубранного рудного керна (440 кг/скв.), можно оценить эмиссию ЕРН у каждой скважины.

Оценим в атмосфере на уровне 1 м от земной поверхности мощность экспозиционной дозы $D_{ф}$, создаваемую U и Th почвы [8, табл. 1.2.7]:

$$\begin{aligned} \text{максимум } D_{фU} &= 52 \text{ Бк/кг} \times 0,0427 \text{ (мкР/ч)/(Бк/кг)} = \\ &= 2,2 \text{ мкР/ч}; D_{фTh} = 48 \text{ Бк/кг} \times 0,0662 \text{ (мкР/ч)/(Бк/кг)} = \\ &= 3,17 \text{ мкР/ч}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{минимум } D_{фU} &= 11 \text{ Бк/кг} \times 0,0427 \text{ (мкР/ч)/(Бк/кг)} = \\ &= 0,47 \text{ мкР/ч}; D_{фTh} = 7,5 \text{ Бк/кг} \times 0,0662 \text{ (мкР/ч)/(Бк/кг)} = \\ &= 0,50 \text{ мкР/ч}. \end{aligned}$$

Следовательно, предполагаемая мощность экспозиционной дозы, создаваемая в атмосфере на уровне 1 м от земной поверхности ураном и торием почвы, находится в интервале 5,37—0,97 мкР/ч. Другие оценки показывают, что средняя мощность поглощенной дозы внешнего облучения, определяемая земными ЕРН почв и пород на открытом воздухе на расстоянии 1 м от земной поверхности для районов с «нормальным» радиационным фоном, составит $(4,85 \pm 1,1) \cdot 10^{-8}$ Гр/ч, что эквивалентно $(4,85 \pm 1,1)$ мкР/ч [8, § 1.2.6.2].

Создаваемая рудным керном у каждой скважины мощность экспозиционной дозы по урану и торию, дополнительная к мощности фоновой экспозиционной дозы почв, составит:

$$D_{\text{Удон}} = 1140 \text{ Бк/кг} \times 0,0427 \text{ (мкР/ч)/(Бк/кг)} = 48,7 \text{ мкР/ч};$$

$$D_{\text{Тдон}} = 4510 \text{ Бк/кг} \times 0,0662 \text{ (мкР/ч)/(Бк/кг)} = 298,6 \text{ мкР/ч}.$$

Следовательно, разведочные работы без уборки рудного керна в кернохранилище приводят к радиоактивному загрязнению земной поверхности, образуя накопленный экологический ущерб. Мощность дополнительного к радиационному фону загрязнения на локальных участках у скважин может в десятки и сотни раз превышать уровень фона почв по урану и тории.

Дополнительная к фоновой мощность экспозиционной дозы, обусловленная рудным керном, достигнет на площадке скважин ориентировочно 347,3 мкР/ч, что существенно превысит мощность экспозиционной дозы почв.

Основная мера защиты ОС от радиации заключается в складировании рудного керна в кернохранилище.

Оценка прогнозного радиационного ущерба персоналу и ОС при отработке участка Буранный проектируемым карьером РЭП. Производительность карьера I очереди по руде ~12 тыс. т в год, отрабатываемые запасы руды ~120 тыс. т. Время работы карьера ~10 лет. Параметры карьера: средняя глубина 40 м, длина и ширина по верху 150 и 120 м, по низу — 64 и 30 м соответственно. Принимаем для расчета среднеарифметические значения параметров: длина 107 м, ширина 75 м. При бортовом содержании руды 3,5 % Nb_2O_5 мощность рудной залежи составляет 20 м. Карьер находится в многолетнемерзлых породах и вытянут в основном направлении розы ветров. Скорость ветра более 1 м/с (принимаем 4 м/с). Отработка карьера производится в зимний сезон, длительность рабочей смены 8 ч, работа односменная, всего 150 смен за сезон.

Оценка радиационного ущерба персоналу. Постоянно действующим источником радиационного воздействия является пласт руды, обнажающийся в стенках карьера, а временными источниками — взрывные работы (взрыв производится 1 раз в две недели), куча взорванной руды, погрузочные работы этой руды, ее транспортировка. Оцениваем ущерб при полном вскрытии рудного пласта.

При оценке радиационного ущерба персоналу учитываем только воздействие пласта руды по Rn при толщине расчетного слоя 0,1 мм от стенок карьера. Воздействие Tn не учитываем, как и воздействие внешнего излучения и долгоживущих радионуклидов. Поэтому ориентировочно вычисляется *минимальное* значение удельной активности, связанное с эманированием Rn. Объемная масса руды — 2,2 т/м³, коэффициент эманирования Rn — 0,247 (табл. 2). Определяем:

удельную массовую активность Rn — $A_{\text{уд. Rn}}$ (Бк/кг);

удельную объемную активность Rn — $A_{\text{об. Rn}}$ (Бк/м³);

активность Rn, поставляемую пластом руды.

Вариант 1: $A_{\text{уд. Rn 1}} = 1140 \times 0,53 \times 0,247 = 149,2 \text{ Бк/кг};$

Вариант 2: $A_{\text{уд. Rn 2}} = 630 \times 0,247 = 155,6 \text{ Бк/кг}.$

Расхождения между двумя вариантами оценки $A_{\text{уд. Rn}}$ незначительны и вызваны теми же причинами, что и при расчете $A_{\text{эфф}}$ (см. выше). Для оценки удельной объемной активности принимаем большее значение удельной массовой активности:

$$A_{\text{об. Rn}} = 2,2 \text{ т/м}^3 \times 155,6 \text{ Бк/кг} = 34,2 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3.$$

Рассчитываем площадь S выхода рудного тела в стенках у основания карьера, а также объем руды V_p , выделяющий Rn из стенок карьера при учитываемой толщине слоя 0,0001 м. Малая толщина учитываемого слоя рудной залежи минимизирует учитываемый объем рудного тела, т.е. минимизирует количество (активность) выделяемого Rn:

$$S = 20 \text{ м} \times 64 \text{ м} \times 2 + 20 \text{ м} \times 30 \text{ м} = 3160 \text{ м}^2;$$

$$V_p = 3160 \text{ м}^2 \times 0,0001 \text{ м} = 0,316 \text{ м}^3.$$

Определяем активность (число распадов за 1 с) Rn, выделяемого рудной залежью, вскрытой в стенках карьера:

$$A_{\text{Rn}} = A_{\text{об. Rn}} \cdot V = 34,2 \cdot 10^4 \text{ Бк/м}^3 \cdot \text{с} \times 0,316 \text{ м}^3 = 10,81 \cdot 10^4 \text{ Бк/с}.$$

Устанавливаем приближенно объем карьера V_k по усредненным размерам:

$$V_k = 107 \times 75 \times 40 = 321\,000 \text{ м}^3 = 32,1 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

Оцениваем естественное проветривание карьера. Естественное удельное проветривание карьера $Q_{\text{уд}}$ согласно формуле, приведенной в работе [6] для поперечного сечения карьера шириной 1 м, глубиной 40 м, при угле наклона подветренной стенки карьера $\alpha = 43^\circ$, ориентировочно составит

$$Q_{\text{уд}} = 0,9 h_c V L n = 1021,68 \text{ м}^3/\text{м} \cdot \text{с},$$

где $h_c = H/[4,6/(\alpha - 20)^2 + 0,046] = 2,2 \text{ м}; H$ — глубина карьера; V — скорость ветра (4 м/с); L — длина проекции подветренной стороны на горизонтальную плоскость (75 м); n — корреляционный коэффициент, учитывающий термические силы (обычно равен 2,5–3).

Определим общий объем воздуха Q_k , протекающего через карьер за 1 с.

$$Q_k = Q_{\text{уд}} L = 1021,68 \text{ м}^3/\text{м} \cdot \text{с} \times 75 \text{ м} = 76\,626 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Время полного обновления воздуха в карьере T составит:

$$T = 321\,000 \text{ м}^3 : 76\,626 \text{ м}^3/\text{с} = 4,2 \text{ с}.$$

За это время в воздухе карьера установится равновесная постоянная удельная объемная концентрация радона — C , Бк/м³:

$$C = 10,81 \cdot 10^4 \text{ Бк/с} \times 4,2 \text{ с} : 32,1 \cdot 10^4 \text{ м}^3 = 1,41 \text{ Бк/м}^3.$$

Если за 4,2 с в 1 м³ карьерного воздуха происходит 1,41 Бк/м³ распадов, то за рабочую смену 8 ч таких распадов Rn будет в $3600 \times 8 : 4,2$ раз больше, т.е. воздействие объемной равновесной активности Rn в смену на рабочем месте составит: $1,41 \text{ Бк/м}^3 \times 3600 \text{ с} \times 8 \text{ ч} : 4,2 \text{ с} = 9668,6 \text{ Бк} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{смена}.$

Рассчитаем суточную дозу $D_{\text{сут}}$, полученную персоналом за 1 смену, пользуясь коэффициентом условного дозового перехода для производственных условий, равным $8 \cdot 10^{-6} \text{ мЗв}/(\text{Бк} \cdot \text{ч}/\text{м}^3)$ [8, § 1.2.5]:

$$D_{\text{сут}} = 9668,6 \text{ Бк} \cdot \text{ч}/\text{м}^3 \cdot \text{смена} \times 8 \cdot 10^{-6} \text{ мЗв}/(\text{Бк} \cdot \text{ч}/\text{м}^3) = 0,077 \text{ мЗв/смена}.$$

Определим годовую дозу $D_{\text{год}}$ персонала за 150 смен:

$$D_{\text{год}} = 0,077 \text{ мЗв/смена} \times 150 \text{ смен/год} = 11,6 \text{ мЗв/год}.$$

Таким образом, за рабочий сезон персонал получит дозу минимум 11,6 мЗв.

Доза горняков в карьере составит 15,9 мЗв/год, если ее оценивать по равновесной концентрации R_n в уравнении, предлагаемом для горняков при подземной добыче на урановых объектах [8, § 1.4.1].

Оценка радиационного ущерба ОС. Расчет выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) по программе Эколог фирмы «Интеграл» показал, что выброс пыли, обусловленный в основном проведением взрывных и транспортных работ, оценивается примерно в 2,73 т/год. Учитывая соотношение мощности рудного пласта и глубины карьера, полагаем, что доля рудной пыли составляет в этом выбросе 50 %, т.е. 1,365 т/год. Принимаем для рудной пыли содержания U и Th , характерные для руд. Тогда годовой выброс этих ЕРН в ОС будет:

выброс $U = 1,365 \text{ т/год} \times 92 \text{ г/т} = 125,6 \text{ г/год}$, за 10 лет эксплуатации — 1,256 кг;

выброс $Th = 1,365 \text{ т/год} \times 1100 \text{ г/т} = 1501,5 \text{ г/год}$, за 10 лет эксплуатации 15,02 кг.

Таким образом, работа карьера РЭП будет связана с существенным облучением работающих в нем и с некоторым привнесом тория и урана в ОС. Персонал карьера должен быть оформлен по категории А. Необходимо обеспечить проведение мониторинга облучения персонала путем организации индивидуального дозового контроля.

Оценка прогнозного радиационного ущерба персоналу и ОС при гидрометаллургической переработке руды. Примем следующие входные данные: производительность гидрометаллургического завода (ГМЗ) по сухой руде 10 тыс. т/год, продолжительность работы — 10 лет. Работа производится 340 сут в году в 3 смены по 8 ч. За сутки перерабатывается 28,57 т руды, за смену — 9,52 т. В продуктах и отходах сохраняются все характеристики радиационной активности руд (табл. 1, 2). В основу расчетов положены схемы переработки руд Томторского месторождения, разработанные ФГУП «ВИМС» и ОАО «Гиредмет» [2, 4].

Основные технологии переработки:
дробление и мокрое измельчение руды;
щелочная гидратация руды;
азотнокислотное выщелачивание гидратного щелочного кека;

экстракционная переработка азотнокислого раствора на карбонаты РЗМ и Sc_2O_3 ;
утилизация маточных растворов.

Постоянно действующими источниками радиационного воздействия данной технологии являются:

- 1) пылегазовые выбросы, сопутствующие дроблению и измельчению;
- 2) пироклоровый концентрат;
- 3) продукт дезактивации и шламы от переработки рафинатов реэкстракции на этапе экстракционного получения Sc_2O_3 и карбонатов РЗЭ;
- 4) щелочные фильтраты от щелочной гидратации руды;
- 5) пыли и аэрозоли в атмосфере рабочей зоны и непосредственно на рабочих местах.

Оценка радиационной опасности пылегазовых выбросов, сопутствующих дроблению и измельчению. Удельные

активности руд сохраняются и в газопылевых выбросах. Поэтому пыли радиационно опасны не менее руд. Масса пылегазовых выбросов варьирует в пределах 50–100 кг/т; принимаем среднее — 75 кг/т. Оценим годовую эмиссию ЕРН выбросов без учета пылегазоочистительных установок:

$$A_U = 75 \text{ кг/т} \times 1 \cdot 10^4 \text{ т/год} \times 1140 \text{ Бк/кг} = 85 \cdot 10^4 \text{ Бк/год.}$$

$$A_{Th} = 75 \text{ кг/т} \times 1 \cdot 10^4 \text{ т/год} \times 4100 \text{ Бк/кг} = 307 \cdot 10^4 \text{ Бк/год.}$$

$$A_{Rn} = 75 \text{ кг/т} \times 1 \cdot 10^4 \text{ т/год} \times 1140 \text{ Бк/кг} \times 0,53 \times 0,247 = 11 \cdot 10^4 \text{ Бк/год.}$$

$$A_{Tn} = 75 \text{ кг/т} \times 1 \cdot 10^4 \text{ т/год} \times 4100 \text{ Бк/кг} \times 0,168 = 51 \cdot 10^4 \text{ Бк/год.}$$

Таким образом, годовая эмиссия ЕРН газопылевых выбросов составит $455 \cdot 10^4 \text{ Бк/год}$ ($4,6 \cdot 10^9 \text{ Бк/год}$).

Оценка радиационной опасности пироклорового концентрата. Выход пироклорового концентрата оставляет 35 % (350 кг/т руды) при содержании U 0,01 % и Th 0,15 %.

Определяем опасность обращения с концентратом по критерию $Th_{экр}$ для условий соотношения $Th / U = 4,1$ при учете равновесия с дочерними продуктами ($A_{с.дпр}$) и без дочерних продуктов ($A_{б.дпр}$) [8, § 1.2.5]:

Удельная активность концентрата и величина $Th_{экр}$ равны

$$A_{с.дпр} = 0,01(4,1 \times 98400 \text{ Бк/г} \times 0,01 \% + 1,0 \times 24 \cdot 10^4 \text{ Бк/г} \times 0,15 \%) = 77,2 \text{ Бк/г}; Th_{экр} = 77,2 : 428 = 0,18;$$

$$A_{б.дпр} = 0,01(4,1 \times 12400 \text{ Бк/г} \times 0,01 \% + 1,0 \times 4100 \text{ Бк/г} \times 0,15 \%) = 11,23 \text{ Бк/г}; Th_{экр} = 11,23 : 54,94 = 0,20.$$

В РФ принято, что вещество представляет радиационную опасность при значении $Th_{экр} \geq 0,1$.

Определим радиационную опасность пироклорового концентрата по критерию $A_{эфф}$ (активность калия не учитываем).

Для этого рассчитываем:

1) массы U и Th в пироклоровом концентрате, получаемом из 1 т руды (350 кг/т руды):

$$M_U = 1 \text{ т} \times 0,35 \times 100 \text{ г/т} = 35 \text{ г};$$

$$M_{Th} = 1 \text{ т} \times 0,35 \times 1500 \text{ г/т} = 525 \text{ г};$$

2) активности Ra и Th в 350 кг пироклорового концентрата:

$$A_{Ra} = 35 \text{ г} \times 0,53 \times 1,24 \cdot 10^4 \text{ Бк/г} = 23,0 \cdot 10^4 \text{ Бк};$$

$$A_{Th} = 525 \text{ г} \times 4100 \text{ Бк/г} = 2 \cdot 10^6 \text{ Бк} = 215,25 \cdot 10^4 \text{ Бк.}$$

3) удельную активность Ra и Th в 350 кг пироклорового концентрата:

$$A_{уд. Ra} = 23,0 \cdot 10^4 \text{ Бк} : 350 \text{ кг} = 657 \text{ Бк/кг};$$

$$A_{уд. Th} = 215,25 \cdot 10^4 \text{ Бк} : 350 \text{ кг} = 6150 \text{ Бк/кг.}$$

В итоге радиационная опасность пироклорового концентрата по критерию $A_{эфф}$ составит:

$$A_{эфф} = 657 \text{ Бк/кг} + 1,3 \times 6150 \text{ Бк/кг} = 8652 \text{ Бк/кг.}$$

Пироклоровый концентрат относится к IV классу радиационной опасности [8, § 1.2.5].

Таким образом, как по критерию $Th_{экв}$, так и по критерию $A_{эфф}$ пироклоровый концентрат определяется как радиационно опасный.

Оценка радиационной опасности продукта дезактивации и шлама от переработки рафинатов реэкстракции на этапе экстракционного получения Sc_2O_3 и карбонатов РЗЭ.

Выход радиоактивного продукта составляет 0,34 кг на 1 т руды при содержании в нем 4,35 % U и 65,59 % Th.

Оценка продукта по величине $Th_{экв}$ для соотношения кларков Th/U = 4,1 как для сочетания ^{238}U и ^{232}Th со своими дочерними продуктами, находящимися в состоянии равновесия с материнскими элементами, так и без такого сочетания дает значения соответственно 47,1 и 5,8, которые однозначно свидетельствуют о радиационной опасности отхода.

Оценим радиационную опасность продукта по значению $A_{эфф}$.

Массы U и Th в продукте, приходящемся на 1 т руды, таковы:

$$M_U = 0,34 \text{ кг/т} \times 4,35 \% = 14,79 \text{ г/т};$$

$$M_{Th} = 0,34 \text{ кг/т} \times 65,59 \% = 223 \text{ г/т}.$$

Активности Ra и Th в продукте, приходящемся на 1 т руды, рассчитаны ниже:

$$A_{Ra} = 14,79 \text{ г/т} \times 1,24 \cdot 10^4 \text{ Бк/г} \times 0,53 = 9,72 \cdot 10^4 \text{ Бк/т};$$

$$A_{Th} = 223 \text{ г/т} \times 4100 \text{ Бк/г} = 91,43 \cdot 10^4 \text{ Бк/т}.$$

Определим удельные активности Ra и Th в продукте:

$$A_{уд. Ra} = 9,72 \cdot 10^4 \text{ Бк/т} : 0,34 \text{ кг/т} = 28,59 \cdot 10^4 \text{ Бк/кг};$$

$$A_{уд. Th} = 91,43 \cdot 10^4 \text{ Бк/т} : 0,34 \text{ кг/т} = 268,91 \cdot 10^4 \text{ Бк/кг}.$$

Таким образом, радиационная опасность продукта по критерию $A_{эфф}$ составит:

$$A_{эфф} = 28,59 \cdot 10^4 \text{ Бк/кг} + 1,3 \times 268,91 \cdot 10^4 \text{ Бк/кг} = 378,17 \cdot 10^4 \text{ Бк/кг}.$$

Из данных приведенного расчета видна высокая радиационная опасность продукта дезактивации и шлама. Он относится к IV классу, и в нем существенно превышено граничное значение [8, § 1.2.5].

Оценка радиационной опасности щелочных фильтратов от щелочной гидратации руды. Объем фильтрата V — 8 м³ на 1 т руды при содержании в нем (г/л) — $1,2 \cdot 10^{-4}$ U и $3,5 \cdot 10^{-4}$ Th. Определяем массы U и Th в объеме фильтрата, приходящемся на 1 т руды. Калий в фильтрате практически отсутствует.

$$M_U = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ г/л} \times 8 \text{ м}^3 = 0,96 \text{ г};$$

$$M_{Th} = 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ г/л} \times 8 \text{ м}^3 = 2,8 \text{ г}.$$

Оцениваем активности Ra и Th в объеме фильтрата, приходящемся на 1 т руды.

$$A_{Ra} = 0,96 \text{ г} \times 0,53 \times 1,24 \cdot 10^4 \text{ Бк/г} = 0,63 \cdot 10^4 \text{ Бк};$$

$$A_{Th} = 2,8 \text{ г} \times 4100 \text{ Бк/г} = 11 480 \text{ Бк}.$$

Вычисляем удельные активности U и Th в объеме фильтрата, приходящемся на 1 т руды:

$$A_{уд. Ra} = 0,63 \cdot 10^4 \text{ Бк} : 8 \text{ м}^3 = 0,79 \text{ Бк/л} = 0,79 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/г};$$

$$A_{уд. Th} = 11 480 \text{ Бк} : 8 \text{ м}^3 = 1,435 \text{ Бк/л} = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/г}.$$

В соответствии с Постановлением правительства РФ № 1069 [5] жидкие отходы, образующиеся при добыче и переработке минерального сырья, не связанного с использованием атомной энергии, относятся к радиоактивным при выполнении следующего условия:

$$A_U + 2,14 A_{Th} > 0,13 \text{ Бк/г}.$$

Из вышеприведенных расчетов следует, что суммарная удельная активность составляет $0,79 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/г} + 2,14 \times 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/г} = 3,87 \cdot 10^{-3} \text{ Бк/г}$, т.е. $< 0,13 \text{ Бк/г}$. Следовательно, щелочные фильтраты не являются радиоактивным отходом.

Оценка радиационной опасности пыли и радиоактивных аэрозолей в атмосфере рабочей зоны и непосредственно на рабочих местах. Запыленность воздуха рабочей зоны составляет 2 мг/м³ при содержании Th — 0,05 мг/м³, $U < 0,01 \text{ мг/м}^3$; концентрация радиоактивных аэрозолей в отделении обработки сырья — $5 \cdot 10^{-5} \text{ Ки/л} = 18,5 \cdot 10^5 \text{ Бк/л} = 18,5 \cdot 10^2 \text{ Бк/м}^3$.

В рабочей зоне активность Th в пыли составит: $A_{Th} = 0,05 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^3 \times 4100 \text{ Бк/г} = 205 \text{ Бк/м}^3$. В предположении равновесия активность ^{220}Rn (Tn) меньше норматива (ДОО) для группы Б, равного 270 Бк/м³; активность ^{222}Rn , судя по концентрации U, также меньше норматива — 1200 [8, § 1.4.3], т.е. по активности ^{220}Rn и ^{222}Rn рабочая зона радиационно не опасна, а отделение обработки сырья по концентрации радиоактивных аэрозолей, активность которых ($18,5 \cdot 10^2 \text{ Бк/м}^3$) превышает ДОО_{Rn} (1200 Бк/м³), представляет радиационную опасность для персонала.

Товарные продукты, получаемые при переработке руды — пироклоровый концентрат, оксид Sc и карбонаты редких земель. За исключением пироклорового концентрата прочие товарные продукты практически не содержат повышенных концентраций ЕРН и могут использоваться без ограничения.

Рафинаты (маточные растворы) со стадии осаждения Sc_2O_3 и редкоземельных металлов и экстракции не содержат повышенных концентраций U и Th и могут после упаривания утилизироваться в качестве тампонажных растворов при бурении нефтяных скважин.

В заключение полагаем, что предложенный вариант прогноза радиационных последствий освоения месторождения, охватывающий оценки радиационной опасности для окружающей среды и персонала руд, продуктов и отходов геологоразведочных работ, добычного комплекса, гидрометаллургического передела, будет полезен специалистам-экологам при составлении экологических разделов проектных документов на освоение месторождений редкометалльных руд с повышенным содержанием ЕРН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аналитические особенности определения естественных радиоактивных элементов в редкометалльных рудах (на примере месторождения Томтор) // М.С. Мельгунов, Б.П. Щербов, Е.В. Лазарева, С.М. Жмодик / Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV междунар. конф. — Томск, 2013. — С. 361–364.
2. Быховский Л.З., Котельников Е.И., Лихниченко Е.Г., Пикалова В.С. Повышение инвестиционной привлекательности редкометалльных месторождений // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 9. — С. 20–25.
3. Лапин А.В., Толстов А.В. Месторождения кор выветривания карбонатов. — М: Наука, 1995.

4. Лихниев Е.Г., Петрова Н.В., Михайлова Н.С. и др. Комплексная переработка ниобий-редкоземельно-фосфатных руд гидрометаллургическим способом // Разведка и охрана недр. – 1999. — № 1. — С. 42–43.

5. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов: Постановление правительства РФ от 19.10.2012 г. № 1069.

6. Порцевский А.К. Вентиляция шахт. Аэрология карьеров (Аэрология горных предприятий): Учеб. пособие. — М.: МГУ, 2004.

7. Пруткин М.И., Шашкин В.А. Справочник по радиометрической разведке и радиометрическому анализу. — М.: Атомиздат, 1975.

8. Россман Г.И., Бахур А.Е., Петрова Н.В. Промышленная радиационная экология минерального сырья. — М.: ВИМС, 2012.

9. Толстов А.В., Коноплев А.Д., Кузьмин В.И. Особенности формирования уникального редкометалльного месторождения Томтор и оценка перспектив его освоения // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 6. — С. 20–26.

© Россман Г.И., Бахур А.Е., Петрова Н.В., 2015

Россман Генрих Ильич // genrih.rossman@yandex.ru

Бахур Александр Евстафьевич // bae@u238.ru

Петрова Нина Владимировна // vims@df.ru

ХРОНИКА

ВКЛАД АРШИНОВЫХ В КУЛЬТУРНОЕ НАСЛЕДИЕ МОСКВЫ

Первый частный научно-исследовательский институт в России — «Литогеа» — построен на личные средства купцом I гильдии, потомственным почетным гражданином г. Москвы Василием Федоровичем Аршиновым для старшего сына Владимира. Строительство началось в 1904 г. по проекту выдающегося архитектора Ф.О. Шехтеля. Он спроектировал уникальное по типологии здание, совмещающее жилую зону с помещениями научной лаборатории и башней астрономической обсерватории. Для воплощения замысла Федор Осипович обратился к стилистике средневековой западной архитектуры. В октябре 2014 г. здание рекомендовано признать объектом культурного наследия.

Институт оснастили современным (по тем временам) оборудованием. Мебель для лабораторий и рабочих кабинетов заказывалась в Германии. Гордость «Литогеа» — библиотека, созданная на основе книг из личного собрания Владимира Васильевича Аршинова с постоянным ее пополнением новинками геологической литературы, и литотека, начало которой было положено приобретением коллекции штуфов и шлифов, закупленных у известной немецкой фирмы Ф. Кранца. В.В. Аршинову удалось сплотить уникальный коллектив из уже известных специалистов и выпускников Московского университета.

Василий Федорович Аршинов, как один из многочисленных меценатов того времени, проявлял заботу не только о своей семье. Он внес большой вклад в благоустройство Москвы. Одним из его и Владимира Василь-

евича детищ стал уникальный парк. Он и сегодня известен как Аршиновский.

В самом конце XIX в. семья арендует участок в районе Новое Царицыно и Воробьевка, а позднее приобретает пустующие земли и прилегающие лесные угодья у д. Котляково. На протяжении многих лет территория благоустраивается и постепенно преобразуется в парк с ландшафтными зонами, уникальность которым придают не произрастающие в лесах Подмосковья деревья — сибирская лиственница, сосна Веймутова, сибирский кедр, сосна Банкса. Преобладание хвойных делало парк естественным продолжением прилегающих лесов с постепенным переходом к смешанной посадке с лиственными: тополь черный, тополь канадский, ясень пенсильванский, ольха серая и др.

Многочисленные дорожки с их диагональным расположением по законам парковой архитектуры, обрам-



Рис. 1. Один из видов парка, начало XX века (из архива ВИМСа)