

с отвальными продуктами (хвосты гравитации, кварцевый продукт доводки, хвосты доводки, класс +0.5 мм) — 10.72 % TiO_2 и 3.55 % ZrO_2 .

По результатам технологических исследований на представительной пробе титано-циркониевых песков Камбулатского месторождения составлен технологический регламент, который включает:

качественно-количественную схему обогащения песков;

характеристику получаемой товарной продукции;

технические характеристики и стоимость рекомендуемого основного технологического оборудования;

схему цепи аппаратов;

водно-шламовые схемы цикла гравитации и доводки, суммарный баланс водопотребления и потребление электроэнергии.

Технологический регламент послужил основой для составления технологической части в «*Технико-экономическое обоснование временных кондиций для подсчета запасов Камбулатского месторождения титано-циркониевых песков*», утвержденных в ГКЗ (протокол № 343-к от 27 февраля 2013 г.), а также для составления технологической части в «*Отчет с подсчетом запасов*», утвержденным в ГКЗ (протокол № 3768 от 25 июля 2014 г.).

© Петкевич-Сочнов Д.Г., 2015

Петкевич-Сочнов Дмитрий Геннадьевич // Petkevich.d.g@gmail.com

ОХРАНА НЕДР И ЭКОЛОГИЯ

УДК 550.35

Овсянникова Т.М. (ФГУП «ВИМС»)

РАДИОАКТИВНОСТЬ РУД РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ: НОРМИРОВАНИЕ, УРОВНИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ (ЧАСТЬ 2)

*Приведены уровни удельных активностей и содержаний радиоактивных изотопов в минералах, рудах редких металлов, а также продуктах их переработки, включая производственные отходы на месторождениях в России и за рубежом. Рассмотрены проблемы нормирования радиоактивности этих объектов и основные методы ее определения. **Ключевые слова:** радиоактивность, редкометалльные руды, природные радиоизотопы, гамма- и альфа-спектрометрия, радиохимический анализ.*

Ovsyannikova T.M. (VIMS)

RADIOACTIVITY OF RARE METAL ORES AND CONVERSION PRODUCTS: REGULATION, ACTIVITY LEVELS AND MEASUREMENT (PART 2)

*The article provides a description of radioisotopes activity concentrations in rare metal minerals and ores, conversion products and wastes on the base of deposits in Russia and abroad as well as examines the problem of the regulation of activity levels and the main methods of their determination. **Key words:** radioactivity, rare metal ores, natural radioisotopes, gamma- and alpha-spectrometry, radiochemistry.*

В первой части статьи (см. № 3 журнала за 2015 г.) были рассмотрены принципы нормирования уровней радиоактивности минерального сырья и производственных отходов, основные методы их определения. Здесь же на основе доступных источников приведена подборка сведений по радиоактивности и изотопному составу руд РМ и продуктов их переработки в России и за рубежом.

В кианитовых рудах, распространенных на Урале, в Карелии и на Кольском полуострове, наряду с други-

ми редкими элементами, присутствуют уран и торий, их содержания составляют соответственно $2,71 \pm 2,53$ и $11,94 \pm 10,6$ г/т (кейвская свита) и $2,92 \pm 1,41$ и $2,71 \pm 1,45$ г/т (Урал) [7].

В рудах редкоземельно-apatитового Селигдарского месторождения содержания ThO_2 (в апатите) составляют 0,02–0,07 % [14].

Содержание урана в рудах Томторского месторождения варьирует в диапазоне 0,0018–0,0892 % (в среднем — 0,0092 %), Th — 0,0191–0,3044 % (в среднем 0,11 %), Ra (экв.) — 0,0302–0,4656 % [16]. В богатых рудах средние концентрации урана и тория оцениваются соответственно в 0,12 и 0,61 % [2]. По данным гамма-спектрометрии (с коррекцией на самопоглощение) основная доля суммарной активности руд этого месторождения обусловлена присутствием тория и его дочерних продуктов распада ($^{228}Ac \approx 7,0 \cdot 10^3$ Бк/кг), активность радиоизотопов уранового ряда — примерно на порядок ниже; эффективные удельные активности в пробах составляют $9,16 \cdot 10^3$ – $1,01 \cdot 10^4$ Бк/кг [6]. Определение активностей радиоизотопов в модельных пробах томторских руд с высокими содержаниями Се, Y, Zr и Nb альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой показало сопоставимые с предыдущими результатами содержания урана и меньшие содержания тория (табл. 1).

Другими примерами высокой радиоактивности руд являются редкометалльные месторождения Среднезимиинское (Ta, попутные Nb, U) и Алгаминское (Zr-редкоземельно-урановое; бадделит в корях выветривания доломитов). Для руд и концентратов последнего характерны высокие содержания урана и радия при фоновом содержании тория (табл. 2).

Еще один проблемный с точки зрения радиоактивности руд объект — месторождение Арбарастах (урантантал-ниобиевое с редкими землями) [1]. Содержания основных компонентов в его рудах достаточно высокие: Nb — до 4,39 %, Ta — до 0,26 %, U — от 0,003 до 0,3 % (иногда до 0,6 %), Th — от 0,005 до 0,03 %.

Таблица 1

Удельная активность радионуклидов в рудах Томторского месторождения по данным альфа-спектрометрического метода (ФГУП «ВИМС»)

Номер пробы	Удельная активность РН, Бк/кг					$A_{эфф}$, Бк/кг*
	^{238}U	^{234}U	^{232}Th	^{228}Th	^{230}Th	
РКС 5Б	380	392	2230	2206	460	3282
РКС(Т)3-Р	778	760	2736	2542	818	4338
РКС1-Nb	1312	1323	4016	4421	1030	6536
РКС(Т)4-К	362	419	1073	1408	447	1760

*Расчитана согласно [9] по измеренным значениям активности ^{238}U и ^{232}Th .

Таблица 2

Удельная активность радионуклидов в концентратах обогащения Алгаминского рудопроявления по данным гамма-спектрометрического анализа (ФГУП «ВИМС»)*

Номер пробы	УА ^{226}Ra , Бк/кг	$A_{эфф}$, Бк/кг**
МТП-1	$8,76 \cdot 10^3$	$9,85 \cdot 10^3$
МТП-2	$2,25 \cdot 10^4$	$2,50 \cdot 10^4$
МТП-3	$7,20 \cdot 10^3$	$8,10 \cdot 10^3$
МТП-4	$1,27 \cdot 10^4$	$1,43 \cdot 10^4$
МТП-5	$1,20 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^4$
МТП-6	$1,97 \cdot 10^4$	$2,20 \cdot 10^4$
МТП-7	$1,22 \cdot 10^4$	$1,36 \cdot 10^4$

*Удельная активность ^{228}Ra , ^{224}Ra , ^{232}Th во всех пробах составила ≤ 70 Бк/кг, а ^{40}K – ≤ 30 Бк/кг.

**Здесь и в табл. 3 и 4 — $A_{эфф}$ рассчитана согласно [9] по измеренным значениям активности ^{226}Ra и ^{228}Ra при допущении соблюдения радиоактивного равновесия в рядах урана и тория.

Радиоактивные концентраты РЗМ (пирохлоровый и гагаринит-флюоритовый), не соответствующие действующим нормативам, получают на Катугинском месторождении (Zr-TR-Nb-Ta) [19].

Зашихинское месторождение было открыто в результате целенаправленных поисков месторождений редкометалльно-гранитного и редкометалльно-щелочно-гранитного типов в Восточном Саяне, завершившихся также открытием Улуг-Танзекского, Снежного и других месторождений [18]. Зашихинское месторождение изучалось также специалистами ВИМСа (В.В. Архангельская, А.И. Гинзбург и др.). К выполнению работ по разработке оптимальных схем обогащения рыхлых руд привлекались лаборатории ЗабГОК и ИРГИРЕДМЕТ, однако эти исследования не были завершены. По результатам этих и других работ оценены прогнозные ресурсы кат. Р₁ колумбита и цир-

кона в рыхлых рудах, извлекаемых по «россыпной» схеме. Содержания урана и тория в колумбитовом концентрате, получаемом на основе сырья Зашихинского месторождения, составляют соответственно 0,035 и 0,08 % по массе [18]. Результаты радиоизотопных исследований руды и продуктов из нее даны в табл. 3.

Золото-редкоземельное россыпное месторождение Центральное в Солурском узле Куларского золотоносного района рассмотрено на электронном ресурсе [8]. Промышленные россыпи золота в этом районе открыты в 1961 г., в 1963 г. на ГОК «Куларзолото» добыта первая тонна металла, а в 1993 г. предприятие было ликвидировано по причине отсутствия запасов. В хвостах золотого обогащения ГОКа были установлены богатые содержания монацита, названного из-за его минералогических и химических особенностей куларитом. Позднее присадка куларита к бедным рудам Киргизского месторождения позволила разработать технологию извлечения оксидов редких земель на Киргизском ГМК. Ресурсы куларита в двух хвостохранилищах ГОКа сейчас составляют 4760 т при среднем содержании $2,266 \text{ кг/м}^3$; содержание тория в мономинеральной фракции куларита — 0,95 % [8].

Выполненный в ФГУП «ВИМС» радиоизотопный анализ других монацитовых концентратов (более 50 проб) показывает, что они характеризуются высоким содержанием изотопов радия, принадлежащих рядам урана и тория (табл. 4). Среднее содержание ^{226}Ra в концентратах составляет $2,6 \cdot 10^4$ Бк/кг, ^{228}Ra — $2,2 \cdot 10^5$ Бк/кг. Если принять условие равновесия в радиоактивных рядах, присущее прочным минералам, можно считать, что активности ^{226}Ra и ^{228}Ra примерно равны активностям ^{238}U и ^{232}Th . Расчетная средняя эффективная удельная активность в этом случае составляет $3,4 \cdot 10^5$ Бк/кг.

В отличие от радиоизотопного состава редкометалльных руд, информации по содержаниям урана и тория в минералах достаточно много, однако практически во

Таблица 3

Результаты определения удельных активностей радионуклидов в руде Зашихинского месторождения и продуктах ее переработки по данным гамма-спектрометрического анализа (ФГУП «ВИМС»)

Проба		Удельная активность РН, Бк/кг					$A_{эфф}$, Бк/кг
номер	характеристика	^{226}Ra	^{228}Ra	^{224}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Исходная руда		135	2200	2200	2200	1090	3314
149	Гравитационно-магнитный концентрат	$3,57 \cdot 10^3$	$4,45 \cdot 10^4$	$4,70 \cdot 10^4$	$4,58 \cdot 10^4$	$4,40 \cdot 10^3$	$6,47 \cdot 10^4$
149	То же конечный	$2,80 \cdot 10^3$	$3,67 \cdot 10^4$	$3,65 \cdot 10^4$	$3,66 \cdot 10^4$	$4,13 \cdot 10^3$	$5,19 \cdot 10^4$
154	Отвальные хвосты (хвосты гравитации)	120	1300	1250	1270	1060	$1,98 \cdot 10^3$
165	Продукт обогащения руды по магнитной схеме	105	860	1070	860	925	$1,40 \cdot 10^3$
166		400	$5,74 \cdot 10^3$	$7,00 \cdot 10^3$	$5,74 \cdot 10^3$	$1,75 \cdot 10^3$	$8,24 \cdot 10^3$
167		750	$1,05 \cdot 10^4$	$1,30 \cdot 10^4$	$1,05 \cdot 10^4$	≤ 150	$1,49 \cdot 10^4$
169		$1,50 \cdot 10^3$	$2,24 \cdot 10^4$	$2,54 \cdot 10^4$	$2,40 \cdot 10^4$	$3,33 \cdot 10^3$	$3,34 \cdot 10^4$
176	Продукт доводки гравитационно-магнитного концентрата	$2,37 \cdot 10^3$	$2,94 \cdot 10^4$	$3,00 \cdot 10^4$	$2,97 \cdot 10^4$	$3,59 \cdot 10^3$	$4,16 \cdot 10^4$
186		$1,87 \cdot 10^3$	$1,67 \cdot 10^4$	$1,76 \cdot 10^4$	$1,71 \cdot 10^4$	$2,67 \cdot 10^3$	$2,49 \cdot 10^4$
186	Продукт доводки колумбитового концентрата	$1,78 \cdot 10^3$	$1,48 \cdot 10^4$	$1,60 \cdot 10^4$	$1,48 \cdot 10^4$	≤ 800	$2,16 \cdot 10^4$

Таблица 4

Выборочные результаты определения удельных активностей радионуклидов в монацитовых концентратах по данным гамма-спектрометрического анализа (ФГУП «ВИМС»)*

Номер пробы	Удельная активность РН, Бк/кг				A _{эфф} , n10 ⁵ Бк/кг
	²²⁶ Ra, n10 ⁴	²²⁸ Ra, n10 ⁵	²²⁴ Ra, n10 ⁵	²³² Th, n10 ⁵	
1	2,53	2,16	2,07	2,16	3,40
2	2,99	2,20	2,09	2,20	3,52
3	2,44	2,15	2,03	2,15	3,38
4	3,11	2,15	2,06	2,15	3,46
5	2,57	2,16	2,06	2,16	3,41
7	2,59	2,13	2,04	2,13	3,37
8	2,76	2,21	2,08	2,21	3,50
14	2,89	2,17	2,07	2,17	3,47
37	2,87	2,32	2,35	2,33	3,69

*Удельная активность ⁴⁰K во всех пробах составила ≤30 Бк/кг.

всех случаях определялись только торий (²³²Th) и уран (²³⁸U), радиоизотопные методы для анализа не применялись (табл. 5, 6).

В общем радиоактивность горных пород, руд и продуктов их переработки определяется их минеральным составом. Радионуклиды — родоначальники радиоактивных рядов распада (²³⁸U, ²³²Th) — могут присутствовать в минералах в качестве примеси и образовывать собственные минералы. Минералы редких земель практически все содержат радиоактивные элементы. В качестве примесей уран и торий присутствуют в основных минералах тантала, ниобия и редких земель: пироклоре (U, Th), гачеттолите (Th), мариньяките (U), микролите (U), ксенотиме (U), бастнезите (Th), паризите (Th), итросинхизите (Th), фергюсоните (U, Th), эвксените (U, Th), гагарините (U, Th) [6].

Торий достаточно широко распространен в земной коре, его максимальные содержания типичны для агпаитовых нефелиновых сиенитов и щелочных гранитов (100 г/т и более) [10]. В магматических породах торий связан главным образом с аксессуарными монацитом, ортитом, сфеном,

апатитом, цирконом, где он изоморфно замещает редкие земли, уран и цирконий. Достаточно часто встречается торит — собственный минерал тория. В агпаитовых фойдитах—луявритах (Ловозеро) торий находится в стенструпине (>10 %), лопарите (~0,7 %), эвдиалите. При рассеянии тория существенную роль могут играть амфиболы, пироксены, биотит, циркон и сфен.

Наиболее высокие концентрации тория характерны для прибрежно-морских и погребенных россыпей (например, монацитовые пески). В Австралии монациты являются главным источником поступления тория в окружающую среду; при содержании Th в монаците порядка 8–10 % и перерабатывающих мощностях при производстве редкоземельных металлов ~22 000 тыс. т/год (например, на заводе «Gebeng») «выход» тория составляет 1760 т/год (~7·10¹² Бк/год) [13]. В табл. 7 приведены содержания тория и урана в монацитах различного происхождения.

Таблица 5

Минералы урана (преимущественно U⁺⁴) и тория, представленные на месторождениях России [10]

Минерал, формула	Содержание ΣU _{ок} или ThO ₂ , %	Месторождение, породы
Минералы урана		
Браннерит UTi ₂ O ₆	51,9	Алдан, сиениты
Уранинит UO ₂	100*	Стрельцовское, гидротермалиты
Бетафит CaUTi ₂ Nb ₂ O ₁₂	31,3	Слюдянка, граниты
Гачеттолит CaUNb ₄ O ₁₃	19,7	Ковдор, фоскориты
Мозандрит Na ₂ Ca ₄ CegTiSi ₄ O ₁₅ F ₃	0,3	Хибины, фойдиты
Ловозерит Na ₂ MnZrSi ₆ O ₁₆ ·H ₂ O	0,1	Ловозеро, фойдиты
Уранофан CaU ₂ Si ₂ O ₁₁ ·6H ₂ O	28	Горное (Забайкалье), гидротермалиты
Бритолит CaCeg ₃ Si ₃ O ₁₂ OH	2,1	Дугда (Тува), сиениты
Ксенотим YgPO ₄	3,5	Чупа (Карелия), граниты
Минералы тория		
Иринит (Na, Ca, Ceg) _{0,9} Th _{0,1} (Ti, Nb)O ₃	13,0	Хибины, фойдит-пегматиты
Тулюкит Na ₆ BaTh(CO ₃) ₆ ·6H ₂ O	24,3	Хибины, фойдиты
Мозандрит Na ₂ Ca ₄ CegTiSi ₄ O ₁₅ F ₃	1,2	
Тор-эшинит (Ceg, Th)TiNbO ₆	29,6	Вишневогорское, миаскиты
Торит ThSiO ₄	77,3	
Th-везувиан Ca ₁₃ (Ceg, Th) ₄ Mg ₄ FeAl ₇ TiSi ₁₈ O ₇₀ (OH) ₆	6,0	Хунчол (Тува), фойдиты
Th-ортит HCa(Ceg, Th)FeAl ₂ Si ₃ O ₁₃	5,6	Карелия, граниты
Иттриалит Yg ₄ ThSi ₆ O ₂₀	20,1	Якутия, щелочные граниты
Th-самарскит (Yg, Fe, U)Nb ₂ O ₆	5,7	
Тор-фергюсонит (Ceg, Th)NbO ₄	12,9	Ильмены, сиениты
Тор-чевкинит Fe(Ceg, Th) ₄ Ti ₃ Si ₄ O ₂₂	20,9	
Лапландит Na ₄ CegTiSi ₇ O ₂₂ ·5H ₂ O	1,3	Ловозеро, фойдиты
ThSi-рабдофанит (Ceg, Th)PO ₄ ·H ₂ O	15,1	
Торстенструпин NaCa(Ceg, Th)Si ₁₃ PO ₁₂	40*	Ловозеро
Карнасуртит Ceg ₂ Al ₂ Ti ₂ Si ₄ P ₂ O ₂₃ ·10H ₂ O	6,0	
Th-Si-монацит (Ceg, Th)(Si, P)O ₄	40	Тува, граниты
CaTh-гадолинит FeBe ₂ (Ca, Yg, Th) ₂ Si ₂ O ₁₀	9,8	Катугинское
Иттрофлюорит (Ca, Yg)F ₂	1,0	Катугинское, щелочные граниты

*Содержание дано в г/т.

Примечание. Ceg — цериевая подгруппа (La—Pm, легкие лантаниды); Ybg — иттербиевая подгруппа (Ho—Lu, тяжелые лантаниды); Gdg — гадолиниевая подгруппа (Sm—Dy, промежуточные лантаниды); Yg — иттриевая группа (Y+Gd+Yb);

Таблица 6
Содержания редких земель, тория и урана (U^{+4}) в редкоземельных минералах [10]

Минерал	Содержание, %			Месторождение
	TR ₂ O ₃	ThO ₂	ΣU _{ox}	
Ферутит	0,9	—	11,3	Алтай
Браннерит	0,5	1,3	48,2	Джида, Бурятия
Лопарит	35,3	0,8	0,02	Ловозеро
Пирохлор	4,5	0,4	1,0	
Стенструпин	20,2	11,3	0,2	
Лапландит	16,8	1,3	—	
Умбозерит	0,4	18,1	—	
Карнасуртит	6,7	6,0	—	
ThSi-рабдофанит	17,2	15,1	—	
Иринит	24,0	23,0	—	Хибины
Th-эшинит	15,9	29,6	1,0	Вишневогорск
Самарскит	14,3	5,7	11,8	Ильмены, Урал
Th-фергусонит	34,2	12,9	—	
Бетафит	1,0	—	31,3	Слюдянка
Тулюокит	—	24,3	—	Хибины
Ортит	11,8	5,1	—	Сев. Карелия
Гадолинит	27,9	9,8	—	Катугинское
Иттрофлюорит	37,0	1,0	—	
Хинганит	26,3	1,3	—	Тува
Бритолит	40,9	9,8	2,1	

Таблица 7
Содержания оксидов тория и урана (%) в монацитах различного происхождения [14]

Соединение	Бразилия	Индия	США
ThO ₂	6,8	9,9	3,4
U ₃ O ₈	0,18	0,27	0,15

Значительные концентрации тория находятся в гидротермалитах, связанных с калиевыми граносиенитами.

Щелочные граниты, пегматиты и гидротермалиты Улуг-Танзекского месторождения богаты U-торитом. На Ковдорском месторождении присутствуют торианит, Th-бетафит, Th-цирклит. Низкотемпературные редкоземельные месторождения (Куларское — Sm-Eu-монацит, Томторское — монацит и флоренсит) отличаются низкими содержаниями тория, то же относится к многим гидротермальным месторождениям урана.

Уран также достаточно распространен, максимальные его содержания среди магматогенных пород относятся к лувэритам Илимаусака — 100 г/т. Главным промышленным и наиболее распространенным минералом урана является уранинит (настуран), менее значимы коффинит и браннерит. Промышленное значение в некоторых случаях имеют гидросиликаты, фосфаты и ванадаты урана. В гранит-пегматитах широко представлены танталониобаты — оксиды урана.

В минералах группы уранинита—торианита проявлен изовалентный изоморфизм U^{+4} —Th, в группе циркона — U—(Zr, Hf)⁴⁺. Повышенное содержание

церия в редких землях этой группы, а также уран-пирохлора может свидетельствовать об изоморфизме Ce^{4+} — U^{4+} — Th^{4+} [10]. Гетеровалентный изоморфизм связывает уран (4+) со скандием, иттрием, лантаном (3+).

Содержание урана в гранитах обеспечивается за счет Zr-Ti-Th-TR-содержащих аксессуаров: торита, циркона, сфена, ортита, монацита, апатита и ильменита. Агпаитовые нефелиновые сиениты содержат уран в стенструпине, ловозерите, эвдиалите, лопарите, мозандрите и др. В отличие от редких земель и тория, уран часто образует ассоциации с халькофильными металлами. Наиболее тесной является связь урана с селеном, ванадием, молибденом и органическим веществом.

Отношение Th/U часто прямо коррелирует с отношениями Nb/Ta, Zr/Hf, Ce/Y и Sr/Ba [10]. В сиенитах и фойдитах это отношение обычно равно 5. Существенная ториевая минерализация связана с Fe-щелочными породами — нефелиновыми и лейцитовыми сиенитами, щелочными гранитами и их гидротермалитами; причем часто эту минерализацию можно считать смешанной (U-Th, TR). Главные типы урановых месторождений (гидротермальные «типа несогласия», «песчаниковые») обеднены Th и редкими землями.

Проблему высокой радиоактивности редкометалльных руд и продуктов их переработки отражают отчеты горнодобывающих компаний и контролирующих органов за рубежом. Так, в отчете национальной службы Австралии по радиационной защите и ядерной безопасности за 2012 г. представлены результаты определения активностей природных радиоизотопов на 29 объектах добычи минерального сырья на территории страны (7 угольных, 12 рудных шахт и др., за исключением урановых). В большинстве случаев удельные активности изотопов в исходной руде, хвостах и твердых отходах на объектах были равновесными и соизмеримыми с уровнями активности почв (20–70 Бк/кг) [11]. Исключение составили три металлорудные шахты, где активности изотопов рядов урана и тория в исходной руде и продуктах добычи превысили условно безопасный уровень 1000 Бк/кг. В рудах зафиксированы высокие активности ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²³⁴U, ²³⁸U, ²³⁰Th, ²²⁸Th, ²³²Th (до 3,33·10³ Бк/кг для ²²⁸Ra). В продуктах обогащения удельные активности радиоизотопов еще более высокие — до 3,74·10⁴ Бк/кг (²²⁸Ra), также «возникают» другие радионуклиды — активность ²¹⁰Po достигает 4,88·10³ Бк/кг, ²¹⁰Pb — 2,65·10³ Бк/кг. Равновесие в рядах распада не соблюдается: в исходных рудах отношение активностей ²²⁶Ra/²³⁸U составляет 0,50–2,2, ²²⁸Ra/²³²Th — 0,9–1,4; в продуктах обогащения диапазон вариаций ²²⁶Ra/²³⁸U изменяется от 1,4 до 2,2, отношение активностей ²²⁸Ra/²³²Th достигает 42, ²¹⁰Po/²¹⁰Pb — до 1,8, ²¹⁰Po/²²⁶Ra — от 0,67 до равновесного.

На этих и других объектах радиационная ситуация усугубляется высокими уровнями активности радона (²²²Rn), в том числе превышающими принятый уровень вмешательства для персонала на рабочих местах — 1000 Бк/м³. В шахтных и технологических водах наблюдается значительное обогащение ²³⁴U и вариации радиоизотопного состава.

На восточном и западном побережьях Австралии разрабатываются месторождения так называемых руд-

Таблица 8
Типичные активности урана и тория в «рудных песках» и продуктах их переработки [12]

Стадия переработки	Материал	Масса, 10 ³ т/год	Удельная активность, Бк/кг	
			Th	U
Добыча и первичная сепарация	Руда	—	20–280	30–120
	Концентрат тяжелых минералов	500	300–3000	<100–800
	Хвосты	6000	<200	<100
	Остатки (крупная фракция)	700	<200	<100
Промышленная вторичная сепарация	Ильменит	300	200–2000	<100–400
	Лейкоксен	10	300–3000	200–600
	Рутил	30	<200–1400	<100–300
	Циркон	60	600–1200	1000–4000
	Концентрат монацита	10	40 000–250 000	6000–30 000
	Остатки (крупная фракция)	6	300–8000	600–2000
	Хвосты	70	800–24000	100–12 000
	Глинистый шлам	1	~2400	~400
Пылевая фракция и др.	2	1000–20 000	100–6000	

ных песков, новые месторождения этого типа открыты в бассейне Мюррей-Даргинг; руды служат источником Тi, Zr, РЗЭ и других полезных компонентов. Главными рудными минералами являются ильменит, лейкоксен, рутил, циркон, монацит и ксенотим. Удельные активности урана и тория в продукции и отходах производства приведены в табл. 8; количество продуктов переработки дано для типичного добывающего и перерабатывающего предприятия. Также в отчете указано, что обычно во время переработки радиоактивное равновесие внутри рядов распада сохраняется, а уровни активности производственных отходов зависят от содержания монацита в исходной руде, которое может весьма существенно варьировать в пределах рудного тела.

На редкоземельном месторождении Маунт-Вельд в Западной Австралии, связанном с щелочными карбонатами, содержание тория оценивается в 626 г/т (2535 Бк/кг). На месторождении Дункан, приуроченном к корам выветривания карбонатитов, содержание Th — 388 г/т (1571 Бк/кг) [15]. Месторождение жильного типа Ноланс Боур (TR-P-U-Th) характеризуется содержанием U₃O₈ 0,02 % и Th 0,27 %. Достаточно высокие содержания тория фиксируются в комплексах щелочных пород; так, на месторождении Гастингс (Zr-Nb-TR) в Западной Австралии содержания тория составляют 259–371 г/т (1049–1503 Бк/кг).

В коре выветривания карбонатитов крупного ниобиевого месторождения Араша (Бразилия) содержания тория ~0,06 % [10]. Уран и торий распределены неравномерно: в рудах кор выветривания отмечаются только следы ThO₂, в бариопирохлоре концентрации оксида тория варьируют от 1,65 до 2,7 %, UO₂ — от 0,5 до 0,8 % [17].

На Чуктуконском месторождении (того же типа, что Араша) содержания ThO₂ и U₃O₈ в исходных рудах составляют соответственно 0,104 и 0,007 %, а в шлаках после переработки руд — 0,57 и 0,024 % [3].

На крупном редкоземельном месторождении Маунтин Пасс (тип — цериевоземельный в карбонатитах, связанных с шонкинит-сиенитовыми комплексами; тот же тип имеет Карасугское месторождение) руды характеризуются невысокими уровнями радиоактивности, что обусловлено низкими содержаниями урана и тория [13].

Австралийская компания Lynas Corporation Ltd в настоящее время строит крупнейшее в мире предприятие в Малайзии по производству редкоземельных продуктов из руд, добытых на территории Австралии (месторождение Маунт-Вельд) и Африки (месторождение Канганкунд, Малави) [13]. Это производство сопряжено с рисками радиоактивного облучения персонала за счет присутствия в рудах большого количества тория. Правительством Малайзии для материалов, содержащих природные радионуклиды, принят контрольный уровень 1000 Бк/кг (МАГАТЭ, МКРЗ), при превышении которого компании следует получать специальную лицензию на работы. В Австралии этот норматив составляет 10⁶ Бк/кг. По оценкам средний уровень радиоактивности отходов предприятия составит 6,1·10⁴ Бк/кг [13]. Это означает, что на строящемся предприятии должны быть организованы специальные условия для предотвращения повышенного облучения персонала.

В Китае средний уровень удельной активности отходов редкоземельных производств — 7,4·10⁴ Бк/кг [13].

Чтобы сократить финансовые издержки, перерабатывающие предприятия предпочитают использовать бастнезитовое редкоземельное сырье, которое характеризуется меньшими содержаниями урана и тория [13].

В состав бастнезита на Чуктуконском месторождении входит уран; в агрегатах минерала может находиться до 0,80 % U₃O₈ [4].

Помимо урана и тория в редкоземельном сырье и продуктах его переработки радиоактивность может быть связана с присутствием радиоактивных изотопов лантанидов (табл. 9).

Таблица 9
Характеристика некоторых радиоактивных изотопов РЗЭ [13]

Элемент	Радиоактивный изотоп	Содержание в природном элементе, %	Вид распада	Период полураспада, лет
La	¹³⁸ La	0,0902	β, γ	1,05·10 ¹¹
Ce	¹⁴² Ce	11,08	2β, γ	>5·10 ¹⁶
Nd	¹⁴⁴ Nd	23,8	α	2,29·10 ¹⁵
	¹⁴⁵ Nd	8,3		>10 ¹⁷
Sm	¹⁴⁷ Sm	15,0		1,06·10 ¹¹
	¹⁴⁸ Sm	11,3		8,0·10 ¹⁵
	¹⁴⁹ Sm	13,8		2,0·10 ¹⁵
Gd	¹⁵² Gd	0,20		
Dy	¹⁵⁶ Dy	0,06	?	>10 ¹⁸
Lu	¹⁷⁶ Lu	2,59	β, γ	4,0·10 ¹⁰

Таблица 10

Удельная активность изотопов урана и тория в чистых оксидах и солях РЗЭ по данным альфа-спектрометрического метода с радиохимической подготовкой (ФГУП «ВИМС»)*

Состав пробы	Удельная активность, Бк/г				
	²²⁸ Th	²²⁷ Th	²³⁰ Th	²³⁸ U	²³⁴ U
La ₂ O ₃	4·10 ⁻⁴	0,150	—	<1·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴
LaBr ₃	5·10 ⁻⁴	0,023	—	<1·10 ⁻⁴	<1·10 ⁻⁴
LaBr ₃	6·10 ⁻⁴	0,033	—	<1·10 ⁻⁴	<1·10 ⁻⁴
La(Ce)Br ₃	0,003	0,021	0,003	<1·10 ⁻⁴	<1·10 ⁻⁴
CeO ₂	0,03	0,052	—	6·10 ⁻⁴	7·10 ⁻⁴
Оксиды РЗЭ	—	43,1	—	—	—

*Удельная активность ²³²Th во всех пробах — менее предела определения метода.

Изотоп ¹⁴²Ce является бета-излучателем с достаточно низкими активностью и энергией излучения и имеет короткую цепочку распада — с образованием бета-излучающего ¹⁴²Pm и стабильного ¹⁴²Nd. Изотоп ¹⁴²Pm распадается достаточно быстро ($T_{1/2} = 19,12$ ч), поэтому ¹⁴²Ce и ¹⁴²Pm обычно рассматривают как двойной бета-излучатель (2β) с энергией 1,417 МэВ; ¹⁴²Pm испускает также фотоны с энергией 1,5756 и 0,5088 МэВ. Около 0,02 % ¹⁴²Pm путем электронного захвата превращается снова в ¹⁴²Ce ($E_{\gamma} = 0,642$ МэВ).

В природном лантане содержится около 0,0902 % ¹³⁸La. Изотоп ¹³⁸La испытывает два вида радиоактивных превращений: бета-распад (33,6 %) и электронный захват (66,4 %). В первом случае энергия бета-излучения составляет 1,044 МэВ, а также испускаются гамма-кванты с энергией 0,7887 МэВ (образуется стабильный ¹³⁸Ce). При электронном захвате с образованием стабильного ¹³⁸Ba испускаются гамма-кванты с энергией 1,4358 МэВ.

Длительные периоды полураспада радиоактивных РЗЭ и их невысокие содержания в природных смесях в большинстве случаев позволяют пренебрегать их активностью, но их влияние следует учитывать при анализе чистых солей и оксидов РЗЭ.

Обычно в таких продуктах, как соли и оксиды РЗЭ, содержания урана и тория оцениваются с помощью традиционных химических методов, ультранизкие содержания (по массе) радиоизотопов не учитываются и не определяют. Однако присутствие даже малых количеств радиоизотопов с высокой удельной активностью (например, для ²²⁸Th и ²²⁷Th удельные активности равны соответственно $3,022 \cdot 10^{13}$ и $1,136 \cdot 10^{15}$ Бк/г) могут создавать потенциальную опасность при обращении с подобными материалами (табл. 10).

Прямое определение ²²⁷Th и вообще всех альфа-излучателей урановых (²³⁸U, ²³⁵U) и ториевого рядов возможно только с использованием альфа-спектрометрического метода с радиохимической подготовкой.

Выводы

Потенциальная радиационная опасность при обращении с редкометалльными рудами и продуктами их переработки, включая производственные отходы, обуславливается высокими и часто неравновесными активностями природных радионуклидов — членов рядов радиоактив-

ного распада урана и тория, эманированием радона, присутствием радиоактивных изотопов РЗЭ. Обеспечение безопасной работы персонала и минимизация вредного воздействия на окружающую среду связаны с дополнительными финансовыми затратами предприятий.

Решение этой проблемы требует достоверной оценки уровней активности «ключевых» природных радионуклидов с использованием современных высокоточных и производительных радиоизотопных методов, таких как высокоразрешающая гамма-спектрометрия и альфа-спектрометрия с радиохимической подготовкой.

Стандартные схемы на таких сложных объектах не могут применяться напрямую, и должна быть разработана методическая основа этих технологий, аттестованы методики измерений, стандартные образцы для калибровки аппаратуры и контроля качества анализа.

Одной из необходимых составляющих обеспечения радиационной безопасности при обращении с радиоактивными редкометалльными рудами и продуктами их переработки является разработка методики их категорирования, которая должна соответствовать международным принципам нормирования и получить соответствующий статус в России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Диденко А.Н., Крюков В.Г., Бердников Н.В. и др. Перспективы развития горного и нефтепромыслового комплексов в Хабаровском крае / Институт тектоники и геофизики ДВО РАН / <http://dvforum.ru>
2. Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справ. Кн. 6. Редкие f-элементы. — М.: Экология, 1997.
3. Кузьмин В.И., Пашков Г.Л., Кузьмина В.Н. и др. Технологические аспекты переработки редкометалльных руд Чукотского месторождения // Химия в интересах устойчивого развития. — 2010. — Вып. 3. — <http://www.sibran.ru/csdx.htm>
4. Лалин А.В., Толстов А.В. Месторождения кор выветривания и карбонатитов. — М.: Наука, 1995.
5. Мельгунов М.С., Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. Аналитические особенности определения естественных радиоактивных элементов в редкометалльных рудах (на примере месторождения Томтор) / Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы IV междунар. конф. — Томск, 2013. — С. 361–365.
6. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых. Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. — М.: НП НАЭН, 2007.
7. Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Савичев А.Н. Редкие металлы и редкоземельные элементы в кианитовых рудах Кольского полуострова и Урала // Тр. ИГГ УрО РАН. — 2013. — Вып. 160. — С. 274 — 281.
8. О проблемах добычи редкоземельных металлов в Республике Саха (Якутия) — <http://nedradv.ru/news/www.zolotonews.ru>
9. СанПиН 2.6.1.2800—10. Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников ионизирующего излучения. — М.: Роспотребнадзор, 2011.
10. Семенов Е.И. Оруденение и минерализация редких земель, тория и урана (лантанидов и актинидов). — М.: ГЕОС, 2001.
11. A Survey of Naturally-Occurring Radioactive Material Associated with Mining // ARPANSA Technical Report. — 2012, August.
12. Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Australian Industries — Review of Current Inventories and Future Generation / A Report prepared for the Radiation Health and Safety Advisory Council, ERS-006 Revision of September 2005 / <http://arpansa.gov.au>
13. Ragheb M. Thorium resources in rare earth elements — <http://mragheb.com>
14. <http://profbeckman.narod.ru/Th.files/L4.pdf>
15. www.australianminesatlas.gov.au
16. www.catalogmineralov.ru/deposit/tomtorskoe
17. www.cbmm.com.br/Repositorio/Media
18. www.columbite.ru
19. www.imcmontan.ru/files/rz.pdf

© Овсянникова Т.М., 2015

Овсянникова Татьяна Михайловна // lab@u238.ru

МОНИТОРИНГ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ АЭС

*Рассмотрены вопросы, связанные с охраной окружающей среды в районах расположения АЭС. Определены границы действия мониторинга гидросферы, направления, по которым осуществляется мониторинг. Предложен подход к проектированию наблюдательной сети, дано описание подсистем наблюдений, оценок и прогноза. **Ключевые слова:** подземные воды, атомная станция, структура мониторинга подземных вод, подсистемы наблюдений, оценок и прогноза.*

Belousova A.P. (Water Problems Institute, RAS)

GROUNDWATER MONITORING AT NUCLEAR POWER PLANT SITES

*The paper deals with problems related to protection of the environment in areas occupied by nuclear power plants. The paper describes the extent of hydrosphere monitoring and guidelines along which monitoring is to be organized. The authors recommend a certain approach toward the planning observation networks and provide description of regime observations, assessment and forecasting subsystems. **Key words:** groundwater, nuclear power plant, structure of groundwater monitoring; subsystem of observation, assessment and forecast.*

Уроки Чернобыля и Фукусимы

Автор являлась одним из разработчиков концепции комплексного экологического мониторинга атомных станций, созданной в 1988–1989 гг. по заданию института «Атомэнергопроект» Минатомпрома после аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС); некоторые авторские подходы этой концепции при организации мониторинга подземных вод изложены ранее [1]. События на атомной станции «Фукусима 1» в Японии показали, что данный подход к организации мониторинга на атомных станциях не потерял своей важности, а скорее всего, стал еще более актуальным для функционирующих, строящихся и проектируемых атомных станций во всем мире, поскольку продемонстрировали, что уроки Чернобыля не были учтены другими странами, ведомствами и компаниями, занимающимися проблемами ядерной энергетики.

Действия, а скорее бездействие, японских атомных компаний, владельцев атомных станций, попавших в зону воздействия землетрясения и цунами, свидетельствовали о полной их беспомощности и растерянности в этой экстремальной ситуации, к которой они должны были быть готовы, если бы выполнили все требования МАГАТЭ по выбору площадок для строительства и ведению мониторинга при строительстве и эксплуатации АЭС.

Полная и безоговорочная уверенность проектировщиков, хозяев АЭС и атомных ведомств в безопасности современных атомных реакторов при работе в любых экстремальных природных и антропогенных условиях привела и может привести на других действующих АЭС

к таким негативным результатам, как это наблюдается в Японии. Как мы видим в настоящее время, подземные воды являются наиболее уязвимым объектом окружающей среды к загрязнению радионуклидами и этот процесс является нерегулируемым на «Фукусиме».

Авария на ЧАЭС в апреле 1986 г. произошла в основном в результате так называемого человеческого фактора и привела к катастрофическим последствиям для некоторых территорий европейской части России. Авария на АЭС «Фукусима 1» случилась в марте 2011 г. предположительно в результате ошибки в проектировании станции (станция устояла при землетрясении, но не выдержала воздействия цунами). Выбросы в атмосферу, загрязнение почв и подземных вод как после аварии на ЧАЭС, так и после аварии на «Фукусиме» характеризуются практически аналогичными наборами радионуклидов, так как на обеих атомных станциях влиянию аварийной ситуации подверглось топливо.

Рассмотрим, как развивалась экологическая ситуация (акцентируя основное внимание на подземных водах) на территориях России, пострадавших от аварии на ЧАЭС.

До аварии на ЧАЭС подземные воды не являлись объектом радиационного мониторинга, но после нее выяснилось, что эти воды чувствительны к радиоактивному загрязнению. В Белоруссии и Украине на загрязненных территориях радионуклиды были обнаружены не только в грунтовых, но и в напорных глубокозалегающих подземных водах. В 70-километровой зоне в результате водной миграции постепенно загрязнялись подземные воды. Радионуклиды в поверхностных и подземных водах образовали концентрации, в 3–5 раз превышающие средний уровень фоновых. В водах многих колодцев в районе ЧАЭС, вскрывших верхние водоносные горизонты, было обнаружено присутствие изотопов ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{144}Ce , ^{106}Ru , что свидетельствует о возможности попадания радионуклидов в подземные воды при фильтрации через зону аэрации.

По данным мониторинга на сегодняшний день на загрязненных в результате аварии на ЧАЭС территориях Брянской области вследствие ветрового подъема пыли с загрязненных почв и хозяйственной деятельности населения до сих пор наблюдается повышенное содержание радионуклидов в воздухе. Основным загрязняющим радионуклидом является ^{137}Cs . Плотность поверхностного загрязнения ^{137}Cs некоторых районов Брянской области составляет более 15 Ки/км². Подземные воды на загрязненных территориях этой области также имеют повышенные значения (выше фонового) концентраций ^{137}Cs [6]. За прошедшие годы после аварии на ЧАЭС подземные воды в различной степени подверглись загрязнению радионуклидами (^{137}Cs и ^{90}Sr) на территориях Тульской, Орловской и Калужской областей.

Состояние атомной энергетики в мире

По состоянию на 31 декабря 2010 г. в мире насчитывался 441 действующий реактор АЭС с совокупной мощностью 375 ГВт (эл.). Это примерно на 4 ГВт (эл.) больше, чем на конец 2009 г., в частности за счет введения в эксплуатацию двух реакторов в Китае и по одному в России, Южной Корее и Индии. Кроме того, в