

Овсянникова Т.М. (ФГУП «ВИМС»)

РАДИОАКТИВНОСТЬ РУД РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ И ПРОДУКТОВ ИХ ПЕРЕРАБОТКИ: НОРМИРОВАНИЕ, УРОВНИ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

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

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 последние десятилетия за рубежом и в России наблюдается интенсивный рост внедрения инновационных технологий с использованием редких металлов (РМ), к которым относят около 50 химических элементов (табл. 1) [6]. Некоторые из них являются радиоактивными, а другие могут сопровождаться в минеральном сырье и продуктах его переработки радиоактивными элементами, что связано с необходимостью оценки уровней радиоактивности и соответствующей классификации по радиационной опасности как самих руд, так и продуктов их передела.

Классификация РМ, показанная в табл. 1, основана главным образом на их принципиальных свойствах. Легкие РМ — это элементы с невысокой плотностью (0,54–1,87 г/см³), близкие по свойствам и методам получения к легким цветным металлам. Тугоплавкие РМ характеризуются высокими температурами плавления (1670–3410 °С).

Элементы рассеянной группы металлов, как правило, находятся в форме изоморфной примеси в минералах других элементов и извлекаются попутно из отходов металлургического и химического производства.

Другую коммерчески привлекательную группу составляют редкоземельные элементы (РЗЭ) — лантаниды, а также скандий и иттрий; эту группу часто называют редкоземельными металлами (РЗМ). Группа РЗЭ состоит из 15 членов — металлов со сходными химиче-

скими свойствами: ⁵⁷La, ⁵⁸Ce, ⁵⁹Pr, ⁶⁰Nd, ⁶¹Pm, ⁶²Sm, ⁶³Eu, ⁶⁴Gd, ⁶⁵Tb, ⁶⁶Dy, ⁶⁷Ho, ⁶⁸Er, ⁶⁹Tm, ⁷⁰Yb, ⁷¹Lu. Pm является радиоактивным элементом с относительно малым периодом полураспада, его количество в окружающей среде чрезвычайно мало. Распространенность РЗЭ в земной коре варьирует от $n \cdot 10^{-3}$ (La) до $n \cdot 10^{-5}$ % (Tm, Lu), и их минеральное разнообразие очень велико. В минералах, богатых РЗЭ, эти элементы сопутствуют друг другу.

В группу радиоактивных металлов входят как элементы, имеющие важное практическое значение в производстве ядерной энергии (U, Pu), так и другие природные (Th, Ra, Po и др.) и искусственно полученные элементы.

В настоящее время крупнейшими потребителями РМ являются наиболее технически развитые страны; в России их потребление главным образом связано с черной металлургией — производством специальных легированных сталей (с добавками Ti, Mo, V, Co, Nb) [6].

Добыча РМ ведется в основном попутно, поскольку большинство из них рассеяны в земной коре, а в рудном сырье они сопутствуют базовым металлам.

Мировое производство РМ не равномерно: первое место по объемам добычи и экспорта занимает КНР, на долю которой приходится около 50 % мировых запасов [6]. Также КНР контролирует почти половину мировых запасов редких земель и до недавнего времени производила 97 % РЗМ [3]. Россия ежегодно производит менее 2 тыс. т РЗМ, что составляет ~1 % от мирового рынка. Потенциал отечественных месторождений РЗМ ограничивается более низким качеством руд (содержанием полезных компонентов), технологичностью, горнотехническими условиями отработки и доступностью [3].

Таблица 1
Техническая классификация редких металлов [6]

Группа периодической системы	Элементы	Группа редких металлов
I	Li, Rb, Cs	Легкие
II	Be	
IV	Ti, Zr, Hf	Тугоплавкие
V	V, Nb, Ta	
VI	Mo, W	
III	Ga, In, Tl	Рассеянные
IV	Ge*	
VI	Se, Te*	
VII	Re	
III	Sc, Y, La, лантаниды	Редкоземельные
I	Fr	Радиоактивные
II	Ra	
III	Ac, Th, Pa, U, Pu и др. ТУЭ	
VI	Po	
VII	Tc	

*Ge относят к металлоидам; Se и Te не являются металлами.

Более 2/3 отечественных балансовых запасов РЗМ находятся в Мурманской области; здесь же расположены и все разрабатываемые месторождения — Хибинская группа апатит-нефелиновых месторождений (42,2 % балансовых запасов) и Ловозерское Ti-TR-Nb-Ta месторождение (25,4 %) [6].

Месторождения Хибинской группы разрабатываются на апатитовое сырье, содержание РЗМ в рудах — около 0,4 % по $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$ [6]. В связи с технологическими трудностями извлечения РЗМ и их низкими содержаниями производство, как правило, является нерентабельным, поэтому редкоземельное сырье складывается в хвостохранилищах обогатительных фабрик. Содержания РЗМ в рудах Ловозерского месторождения ~1,12 %, и в настоящее время только здесь они извлекаются попутно с Ti, Ta и Nb.

Перспективная база РЗМ главным образом связана с Иркинцевской металлогенической зоной, где сосредоточена большая часть прогнозных ресурсов (84,3 %) [6]. Здесь разведано Чукотское месторождение (содержание $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$ 7,32 %, ~8 млн. т), которое при имеющихся перспективах наращивания запасов может быть сопоставлено с месторождением Баюнь Обо (Fe-TR-Nb, содержание РЗМ ~8 %). В этой же зоне выявлено еще одно рудопроявление РМ — Кийское (Nb, Zr, Li), в рудах которого содержание оксидов РЗМ в отдельных пробах достигает 20 % (в среднем 5,9 %). Чукотское месторождение по геолого-промышленному типу и по содержаниям РЗМ близко к уникальному по запасам ниобия и РЗМ Томторскому месторождению в Якутии, в котором среднее содержание оксидов РЗМ достигает 8–12 %, в том числе 0,5 % наиболее ценного Y_2O_3 . Разведанные запасы месторождения составляют 150 млн. т (из них 119,3 тыс. т — $\Sigma \text{TR}_2\text{O}_3$).

В настоящее время в России сырьевой базой по Nb и Ta является комплексное Ловозерское лопаритовое месторождение [3]. Перспективными для добычи Nb также представляются Томторское, Белозиминское и Татарское месторождения. По Zr перспективны месторождения Туганское (Томская область) и Аллуайвское (в непосредственной близости к Ловозерскому месторождению).

Запасы Mo в России распределены по многим месторождениям [3]. К промышленному освоению готовятся Бугдаинское и Южно-Шамейское месторождения. Почти все текущее горное производство Mo на данный момент сосредоточено на двух ГОКах, действующих на Сорском и Жирекенском месторождениях.

Бериллиевое сырье добывалось на Завитинском и Ермаковском месторождениях в Бурятии, которые в последнее время не эксплуатируются [3].

По запасам Li Россия занимает одно из ведущих мест в мире. Важным источником Li могут быть Этыкинское и Княжевское месторождения в Забайкалье, их прогнозные ресурсы оцениваются в 260 тыс. т Li, а запасы определены в количестве $n \cdot 100$ тыс. т [3].

Производство Zr и Hf на данный момент основано на единственном сырьевом источнике — бадделеитовом концентрате Ковдорского железорудного месторождения. Сырьевой базой для производства Ge является ряд месторождений германиеносных углей, прежде всего Новиковского (Сахалин), Павловского (Примор-

ский край) и Тарбагатайского (Читинская обл.). Разрабатываемых природных источников ренийового сырья Россия практически не имеет.

Особенность большинства месторождений РЗМ на территории России — большая полиметалличность и относительно низкое содержание полезных компонентов в рудах (в 2–5 раз меньше, чем за рубежом) [6].

Одним из важных факторов работы с редкометалльным сырьем на многих месторождениях как в России, так и за рубежом, является высокая радиоактивность руд, которая связана с присутствием значительных количеств радиоактивных элементов.

На территории РФ представлены редкометалльные месторождения разных типов, на некоторых из них в число полезных компонентов (основных или попутных) входят следующие радиоактивные элементы [1, 5]:

Аллуайвское (TR-Zr в массивах нефелиновых сиенитов) — торий;

Карасугское (Ce-земельный в карбонатитах, связанных с шонкинито-сиенитовыми комплексами) — уран, торий;

Улут-Танзекское (Zr-Nb-Ta в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда) — торий, уран;

Зашихинское (Zr-Nb-Ta в метасоматитах по гранитоидам щелочного ряда, а также в корах выветривания по гранитоидам с колумбитом и в россыпях) — торий, уран;

Катугинское (Zr-TR-Nb-Ta в щелочных метасоматитах по метаморфическим породам) — уран;

месторождения Онежского рудного района, Средняя Падма (U-V в карбонатно-слюдистых метасоматитах) — уран;

Туганское (Zr-Ti в прибрежно-морских россыпях; Sc-Zr-Ti в прибрежно-морских и аллювиальных россыпях) — торий;

Степное (Sc-TR в рудах урановых месторождений, связанных с костными остатками рыб) — уран;

Далматовское (V-Sc-Re в рудах урановых пластово-инфильтрационных месторождений) — уран.

Меньшие количества радиоактивных элементов обуславливают повышенную радиоактивность редкометалльных руд и продуктов их переработки на других месторождениях, где радиоактивные элементы могут входить в состав рудных минералов, рудных концентратов, а также производственных отходов.

Г.И. Россманом и др. [4] сделан вывод о концентрировании радионуклидов при обогащении редкометалльных руд; для дезактивации концентратов при производстве Ta, Nb и РЗМ (перовскитового, лопаритового, эвдиалитового, сфенового, колумбитового, пироксенового и др.) применяются специальные технологии на основе различных химических методов с образованием радиоактивных кеков.

В результате пирометаллургического передела концентратов с получением слабоактивной товарной продукции также формируются радиоактивные шлаки. Так, удельная активность отвального шлака металлургического передела Этыкинского концентрата составляет примерно $1,1 \cdot 10^5$ Бк/кг [4].

Международные нормы контроля и защиты окружающей среды, российские законы в области радиа-

ционной безопасности персонала предприятий и населения на прилегающих территориях предполагают контроль радиоактивности минерального сырья, продуктов его переработки и производственных отходов, что может сказываться на изменении цепочки технологических процессов и вызывать удорожание конечной продукции.

Например, согласно «Техническому отчету по организации обращения с NORM в производственных отходах» (NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) — природные радиоактивные вещества), в Канаде без ограничений допускается обращение с производственными отходами, в которых активность «ключевых» радионуклидов (РН) не превышает значений UDLR (Unconditional Derived Release Limits — уровни активности РН, при которых не ограничивается обращение с материалами (неограниченное поступление в окружающую среду)) [9]. Ключевыми природными РН считаются:

^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb (в ряду ^{238}U);
 ^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Th (в ряду ^{232}Th);
 ^{40}K .

Оценка риска, возникающего при обращении с природными радиоактивными материалами, производится путем сопоставления измеренных в них удельных активностей ключевых РН с уровнями ограничения — DRL (Derived Release Limits), которые приняты для этих РН в различных формах NORM.

Уровни UDLR — это специальные уровни, разработанные для разных форм NORM таким образом, что обусловленная ими доза облучения населения составляла менее 0,3 мЗв/год, что, согласно [7], считается «безопасной» дозой. Если измеренные значения удельных активностей РН в NORM не превышают соответствующие UDLR, то NORM не требуют дальнейшего радиационного контроля и могут использоваться без ограничений. Для справки значения UDLR для твердых и жидких форм NORM приведены в табл. 2.

Классификация NORM производится по результатам радиохимического анализа. Типичную схему оценки производственных отходов и других объектов, где предполагается наличие NORM, можно представить следующим образом [9]:

выполняется «скрининговое» обследование гамма-спектрометрическим и альфа-бета-радиометрическим способом;

при превышении интенсивности гамма-излучения от объекта двух уровней фона и поверхностной активности уровня 1 Бк/см² выполняется представительный пробоотбор и радиохимический анализ проб на ключевые РН;

при превышении измеренных уровней активности ключевых РН соответствующих значений UDLR объекты (отходы) признаются NORM;

NORM классифицируют (разделяют) в соответствии с их формой и уровнями активностей РН.

Результаты оценки (классификации) служат основой разработки мер по обращению с отходами (объектами), включая упаковку, хранение, транспортирование и др.

Анализ активности РН в материалах выполняется лабораторными методами, среди которых можно выде-

лить два основных: высокоразрешающую гамма-спектрометрию и альфа-спектрометрию с радиохимической подготовкой проб. Обычно гамма-спектрометрическим способом измеряют активности ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{234}Th ; определение ^{210}Pb этим методом достаточно сложное, поскольку требует длительных измерений и учета самопоглощения гамма-квантов в анализируемом материале. Альфа-спектрометрия используется обычно для определения низких активностей радионуклидов, например, ^{228}Th , ^{210}Po .

При транспортировании объектов NORM с суммарной активностью более 70 Бк/г в Канаде начинает «работать» регулирование TDG (Transportation of Dangerous Goods). Согласно этому документу в объектах, подлежащих транспортировке, рекомендуется установить удельную активность каждого РН и вычислить суммарную активность для сопоставления ее с уровнем 70 Бк/г. Учету подлежат только РН с периодами полураспада более 10 сут; для рядов урана и тория — это ^{234}Th (в равновесии с ^{238}U , ^{234}U), ^{230}Th (твердые пробы), ^{226}Ra , ^{210}Pb (в равновесии с ^{210}Po), ^{228}Th , ^{228}Ra . Если для объекта характерно равновесие в рядах радиоактивного распада, то для определения этих РН может использоваться гамма-спектрометрический анализ с высоким энергетическим разрешением.

Суммарная удельная активность (TRC), согласно TDG, рассчитывается как

$$\text{TRC} = 3A_{^{234}\text{Th}} + A_{^{230}\text{Th}} + A_{^{226}\text{Ra}} + 2A_{^{210}\text{Pb}} + A_{^{228}\text{Th}} + A_{^{228}\text{Ra}}, \quad (1)$$

где удельные активности всех РН (A) и суммарная активность выражаются в Бк/г.

Рассмотренные нормативные документы Канады, а также США в той или иной степени согласованы с реко-

Таблица 2
Значения UDLR для твердых и жидких форм NORM [9]

Радионуклиды	NORM	
	твердые, Бк/кг	жидкие, Бк/л
Ряд ^{238}U (Σ)	300	1
^{238}U	10 000	10
^{230}Th	10 000	5
^{226}Ra	300	5
^{210}Pb	300	1
Ряд ^{232}Th (Σ)	300	1
^{232}Th	10 000	1
^{228}Ra	300	5
^{228}Th	300	1
^{40}K	17 000	Не ограничено

Таблица 3
Отношения нормативов (уровней освобождения) для природных радионуклидов по RS-G-1.7 и RP 122 (RS/RP) [8]

RS/RP (до)	Радионуклиды
0,01	^{231}Th
0,1	^{210}Bi , ^{234}Th
1	^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{227}Th , ^{234}U , ^{235}U , ^{238}U
10	^{40}K , ^{228}Th , ^{230}Th
100	^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{227}Ac , ^{232}Th , ^{231}Pa

Таблица 4
Удельные активности природных радионуклидов в объектах окружающей среды [8]

Объекты	Удельная активность, Бк/кг			
	²³⁸ U	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
Почвы:				
медиана: диапазон/среднее	(16–110)/35	(17–60)/35	(11–64)/30	(140–850)/400
средневзвеш. среднее	33	32	45	420
Руды и минеральное сырье:				
монацит	6–40	6–40	8–300	—
циркон	0,2–74	0,2–74	0,4–40	—
Производственные отходы:				
Sn-шлак	1	1000–1200	4	—
отходы переработки монацита		До 450	3000	
Al-шлак	260–540	150–330		

мендациями Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ) и МАГАТЭ в области ограничения суммарной дозы облучения персонала и населения. Однако МКРЗ «разрешает» неограниченное обращение с материалами, в которых удельные активности не превышают 1000 Бк/кг по ключевым радионуклидам, как для концентрированных, так и для рассеянных источников.

Нормативные документы Европейского союза и МАГАТЭ по ограничению радиоактивности материалов (RP 122 и IAEA Safety Guide RS-G-1.7 соответственно) расходятся по самим принципам расчета и весьма существенно — по значениям показателей (табл. 3). Если в RP 122 «нормативы» по природным РН рассчитаны так же, как для искусственных РН, — согласно «сценариям» возможного индивидуального облучения (дозы), то в документе RS-G-1.7 они даны на основе средних содержаний природных РН в объектах окружающей среды — почвах, NORM (табл. 4).

Для международного регулирования, как правило, используется стандарт МАГАТЭ, определяющий уровни удельной активности, при превышении которых должны приниматься меры регулирования (IAEA BSS — Basic Safety Standards).

NORM связаны не только с производственными отходами, но и с исходным сырьем, которое в большинстве случаев обуславливает минимальный радиационный риск, если не происходит изменение материала. Однако при некоторых производственных процессах, например, различных видах обогащения, происходит концентрирование NORM. Концентрированные («технологически обогащенные») формы NORM иногда называют TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material).

Агентство по защите окружающей среды США приводит виды TENORM, образующихся при добыче РЗЭ, титановых, циркониевых и урановых руд, а также диапазоны их активностей [10]. Отходы добычи РЗЭ (руды с монацитом, ксенотимом и бастнезитом) характеризуются суммарными удельными активностями на уровне от 210 до 119 288 Бк/кг. У титанового сырья активности обычно невысокие — в среднем 211 Бк/кг (ильменит) и 729 Бк/кг (рутил); отходы добычи обладают активностями от 144 до 1665 Бк/кг (в среднем 444 Бк/кг). При добыче циркониевых руд удельные активности отходов

варьируют в диапазоне 2516–48 100 Бк/кг при среднем значении 3219 Бк/кг. Урановые руды являются источником TENORM с активностью от 11 100 до 111 000 Бк/кг. Эти уровни активностей редкометалльного сырья и отходов предполагают применение соответствующего регулирования и радиационного контроля.

В России обращение с минеральным сырьем и материалами с повышенным содержанием радионукли-

дов регулируется СанПиН 2.6.1.2800—10, согласно которым к сфере регулирования относится следующее сырье и материалы с эффективной удельной активностью $A_{эфф}$ не менее 740 Бк/кг:

сырье для производства огнеупоров и огнеупорная продукция;

руды и минералы РМ и РЗМ;

концентраты РМ, РЗМ и других металлов (цирконовый, рутиловый, танталовый, молибденовый, вольфрамовый, бадделеитовый, лопаритовый, оловянный, ильменитовый и др.), а также продукция на их основе;

руды и продукты их переработки, содержащие ⁴⁰K;

отдельные виды фосфатного сырья и продукты их переработки.

В зависимости от значения $A_{эфф}$ в минеральном сырье и материалах, их разделяют на несколько классов (табл. 5), для которых предусмотрены различные правила обращения. Транспортирование сырья и материалов с $A_{эфф}$ не более 10 000 Бк/кг считается безопасным (согласно СанПиН 2.6.1.2800—10).

Расчет параметра $A_{эфф}$ выполняется по формуле

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_K, \quad (2)$$

где A_{Ra} , A_{Th} и A_K — соответственно удельные активности ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K (Бк) при условии равновесия в рядах распада урана и тория.

Производственные отходы с повышенным содержанием радионуклидов также категоризируются (табл. 6).

Обращение с отходами I категории не ограничено, т.е. аналогично любым промышленным отходам; для других категорий разработаны соответствующие правила. Захоронение отходов II категории производится на специальных участках, при этом должен выполняться радиационный контроль мест захоронения.

Таблица 5
Классификация минерального сырья и материалов с повышенным содержанием радионуклидов согласно СанПиН 2.6.1.2800—10

Класс	$A_{эфф}$ природных РН, Бк/кг
I	≤740
II	>740 ÷ ≤1500
III	>1500 ÷ ≤4000
IV	>4000

Таблица 6

Классификация производственных отходов, содержащих природные радионуклиды согласно СанПин 2.6.1.2800—10

Категория	$A_{эфф}$ природных РН, Бк/кг
I	≤ 1500
II	$> 1500 \div \leq 10\,000$
III	$> 10\,000$

Таблица 7

Уровни радиоактивности и классификация горнопромышленных отходов, содержащих природные радионуклиды [2]

Объекты	Категория, $A_{эфф}$ Бк/кг
Вскрышные породы базит-гипербазитового состава (сопчеозерские дуниты, пильгуйрвинские габбро) и кислого состава (кировогорские гнейсы)	I
Хибиниты Ловчорра	I 290
Вскрышные породы месторождений Коашва, Расвумчорр	II 420
Вскрышные породы Ловозерского и Куэльпорр-ского апатит-нефелиновых месторождений	III 840–1210
Хвосты обогащения, шлаки и шламы гидрометаллургических производств (на рудах месторождений: Ловозерских РМ, Ковдорского бадделеитового, Африкандского перовскитового)	II–IV До 3700

Отходы III категории регулируются как низкоактивные радиоактивные отходы.

Рассмотренная выше классификация применяется для оценки возможности использования горнопромышленных отходов с хозяйственными целями, например, для производства строительных материалов (табл. 7) [2].

В целом нормативы по радиационной безопасности минерального сырья в РФ более жесткие, чем за рубежом («безопасный» уровень МКРЗ — 1000 Бк/кг, в России — 740 Бк/кг; ограничение «безопасного» транспортирования в Канаде — 70 Бк/г, в России — 10 Бк/г). Однако подходы к классификации радиоактивных материалов и расчету нормируемых показателей отличаются — см., например, формулы (1) и (2).

Несмотря на наличие требований по определению радиоактивности и радиоизотопному составу редкометалльных руд как в России, так и за ее пределами, эти исследования выполняются ограниченно, и доступные материалы, как правило, относятся к отдельным видам сырья или продуктов конкретных месторождений либо минералам. Такая же закономерность обнаруживается в базе стандартных образцов. Среди причин можно назвать следующие:

относительную «новизну» объектов, так как, согласно стереотипу, радиоэкологические проблемы затрагивают только урановую добычу и производство;

недостаточное развитие радиоспектрометрических и вообще изотопных методов в прошлом, в том числе в связи с относительно высокими стоимостью и трудоемкостью анализа;

сложность объектов для анализа — как инструментального, так и радиохимического.

Определение уровней радиоактивности руд РМ и продуктов их переработки представляет собой нетривиальную задачу, поскольку из-за непостоянного и не-

равновесного радиоизотопного состава этих материалов оно не всегда может быть обеспечено относительно простыми инструментальными методами, а также косвенным способом.

Отмечается [2], что для сырья, продуктов переработки и отходов горнорудных и гидрометаллургических производств Кольского полуострова (за исключением вскрышных пород и хвостов обогащения редкометалльных руд) оценка средних значений $A_{эфф}$ не является достаточной, так как эти объекты характеризуются высокой неравномерностью распределения и содержаний радиоактивных акцессорных минералов.

Стандартный радиоизотопный спектрометрический анализ требует предварительной радиохимической подготовки счетных образцов с разложением проб, переводением радиоактивных элементов в раствор и отделением их от мешающих компонентов, в том числе радиоактивных — с близкими энергиями излучения. При анализе редкометалльного сырья выполнение этих процедур осложняется присутствием устойчивых минералов, таких как монацит и циркон, высокими содержаниями отдельных мешающих элементов, например Р, Si, Се. Кроме того, для спектрометрии альфа-излучения необходимы очень тонкие (спектрометрические) счетные образцы.

Во многих случаях для таких исследований могла бы использоваться высокоточная и производительная масс-спектрометрия со связанной плазмой, однако в круг определяемых с ее помощью элементов не входят относительно короткоживущие и наиболее радиотоксичные изотопы, например ^{210}Po . Кроме того, из-за высокой стоимости аппаратуры и ее обслуживания этот вид анализа все еще не достаточно распространен.

Во второй части статьи будет приведена подборка сведений по радиоактивности и изотопному составу руд РМ и продуктов их переработки в России и за рубежом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Быховский Л.З., Потанин С.Д. Геолого-промышленные типы редкометалльных месторождений. — М.: РИС ВИМС, 2009.
2. Мельник Н.А. Радиационный контроль горнопромышленных отходов — основа качества сырья для строительных и технических материалов / Формирование основ современной стратегии природопользования в Евро-Арктическом регионе. — Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2005. — С. 224–229.
3. РМЗ: Росатом позади паровоза / <http://atomicexpert.com/content/рзм-росатом-позади-паровоза>
4. Россман Г.И., Бахур А.Е., Петрова Н.В. Промышленная радиационная экология минерального сырья // Минеральное сырье. — 2012. — № 25. — С. 236–237.
5. Солодов Н.А., Семенов Е.И., Усова Т.Ю. Минеральное сырье: Иттрий и лантаноиды. Справ. — М.: Геоинформмарк, 1998.
6. Твердохлебова Т.В., Усова Е.А. Мировой и российский рынок редких металлов: текущее состояние // Проблемы современной экономики. — 2011. — № 4 (40). — С. 102–105.
7. Canadian Guidelines for the Management of NORM. — 2000.
8. Comparative Study of EC and IAEA Guidance on Exemption and Clearance Levels / European Commission Radiation Protection. N 157 / Directorate-General for Energy / Directorate D — Nuclear Energy, Unit D4 — Radiation Protection, 2010.
9. Technical Report on the Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in Waste. Final Draft // NORM Waste Management Technical Committee. — 2005, Feb.
10. www.epa.gov / EPA Home — Radiation Protection Programs — Naturally Occurring Radiation — TENORM — Mining Wastes.

© Овсянникова Т.М., 2015

Овсянникова Татьяна Михайловна // lab@u238.ru