

УДК 625.7/.8(470.661)

Сырьевая база рассеянных элементов России: состояние и использование*

Л.В. Спорыхина, Л.З. Быховский, А.Д. Чернова (Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья имени Н.М. Федоровского, Москва)

Уточнено содержание термина "рассеянные элементы", обозначена роль России в их мировых запасах, добыче и использовании. Приведены данные о состоянии сырьевой базы рассеянных элементов России. Отмечено, что при наличии крупных запасов большинства рассеянных элементов в товарную продукцию извлекается только часть из них, остальные теряются и списываются с баланса. Подчеркнуто, что в стране есть технологические возможности получения всех рассеянных элементов при возникновении на них промышленного спроса.

Ключевые слова: рассеянные элементы; мировые запасы; добыча; сырьевая база; товарная продукция; области применения.



Лидия Викторовна СПОРЫХИНА,
ведущий научный сотрудник,
кандидат геолого-минералогических наук



Лев Залманович БЫХОВСКИЙ,
главный научный сотрудник,
доктор геолого-минералогических наук



Александра Дмитриевна ЧЕРНОВА,
заведующая отделом мониторинга
МСБ ТПИ и недропользования

Термин "рассеянные элементы" – исторически сложившееся и в значительной мере условное понятие. Это обособленная своеобразная группа редких металлов, которые, как правило, не образуют практически значимых самостоятельных месторождений, а их собственные минералы либо отсутствуют, либо редки и не дают промышленных скопленений, представляя в основном минералогический интерес. К ним в России принято

относить (в алфавитном порядке): ванадий, галлий, германий, гафний, индий, кадмий, рений, рубидий, селен, скандий, таллий, теллур, цезий. Некоторые из них (V, Re, Ge, Cs, Sc, Se) имеют собственные месторождения с небольшими запасами, которые, как правило, не представляют значительного промышленного интереса и не отрабатываются или уже отработаны. Рений, скандий и германий отнесены к стратегическим видам минерального сырья. В едином выпуске государственного баланса полезных ископаемых учтены 11 рассеянных элементов, а ванадий и кадмий имеют собственные балансы [1-3]. Кроме того, запасы ванадия учитываются в некоторых месторождениях нефти [4].

Основные запасы и добыча всех рассеянных элементов связаны с рудами и месторождениями других полезных ископаемых, в которых они находятся в виде попутных компонентов преимущественно в форме изоморфной примеси, редко в качестве микровключений в составе основных минеральных образований. Ученные в РФ запасы рассеянных элементов заключены преимущественно в минералах комплексных многокомпонентных месторождений, среди которых преобладают месторождения существенно сульфидными рудами: медно-колчеданные, полиметаллические, свинцово-цинковые, сульфидно-медно-никелевые. Реже концентраторами рассеянных элементов выступают железорудные, бокситовые, апатит-нефелиновые, пегматитовые, урановые, оловорудные месторождения, а также месторождения многих других полезных ископаемых, в том числе углей, нефти, битумов, калийных солей.

Известно, что повышенные концентрации большинства рассеянных элементов могут присутствовать не только в рудных, но и в породообразующих минералах. Так, скандий в пироксенах и амфиболах титаномагнетитовых руд месторождений Качканарской группы при обогащении накапливается в составе крупно-

* При подготовке настоящей статьи были использованы материалы, любезно предоставленные сотрудниками ИМГРЭ – Н.М. Волковой, Г.С. Гулевской, Т.И. Зуевой, Д.С. Ключаревым, Е.Д. Михеевой, Н.С. Поликашиной, М.В. Ториковой, Т.Ю. Усовой и Р.И. Фарфель, за что авторы выражают им искреннюю благодарность.

объемных хвостов, где его вероятные запасы могут отвечать масштабам крупного месторождения. Запасы цезия и рубидия в литиеносных слюдястых минералах хвостохранилищ Ярославского ГОКа, представляющих отходы отработки флюоритовых месторождений Вознесенского рудного узла в Приморье, по масштабам отвечают среднему месторождению. Иногда рассеянные элементы являются одним из основных полезных компонентов руды комплексного состава, как, например, скандий в скандий-редкоземельно-ниобиевом Томторском месторождении, цезий в пегматитовом Вороньютундровском месторождении и др.

Вместе с тем в качестве попутных компонентов государственным балансом учитываются находящиеся в рассеянном состоянии запасы таких металлов, как редкие земли и стронций в апатите, ниобий в сфене, литий в слюдах, тантал, ниобий, редкие земли в лейкоксене и т.д. Но все эти редкие металлы имеют собственные минералы и месторождения, с которыми связаны их основные запасы и добыча, и к группе рассеянных элементов не относятся.

В отличие от других полезных ископаемых исходным сырьем для получения товарной продукции рассеянных элементов служат не природные руды, а продукты и отходы их обогащения и передела. В связи с этим большое значение имеет уровень концентрации рассеянных элементов в минералах-носителях: чем выше содержание попутного компонента в титульном минерале и соответственно его концентрате, тем больше предпосылок для извлечения из него рассеянного элемента с получением товарной продукции. В то же время некоторые вопросы методики оценки, подсчета и учета запасов рассеянных элементов нуждаются в уточнении, возможно и пересмотре [5].

По запасам и добыче практически всех рассеянных элементов Россия занимает ведущие места в мире (таблица). Разрабатываются десятки комплексных месторождений, содержащих по-

путные рассеянные элементы, но в большинстве случаев при обогащении и переделе профилирующих руд они не извлекаются и либо скапливаются в хвостохранилищах, либо безвозвратно теряются с отходами производства.

Среди рассеянных элементов наиболее широким диапазоном условий встречаемости в природе и количеством минералов-носителей отличаются ванадий и скандий.

Ванадий – широко распространенный и востребованный металл, имеющий важное промышленное значение и во многом определяющий качество современной металлургии. В природе известно более сотни собственных минералов ванадия, их число ежегодно пополняется, но лишь только некоторые его оксиды имеют практическое значение. Содержание ванадия в собственных минералах колеблется от первых единиц до 29 % (патронит, роскоэлит), достигая почти 65 % в минерале паскоит на урановых рудниках Перу.

Основные промышленные запасы ванадия сосредоточены именно в минералах, в которых он присутствует в виде изоморфной примеси. Наибольшую практическую значимость среди таких минералов-носителей ванадия играют титаномагнетит (до 4,9 % ванадия), магнетит (до 0,5 %), ильменит (до 0,2 %). Кроме них повышенные содержания ванадия отмечены в хромите (до 1,2 %), ильменорутиле (3 %), давидите (2 %), а также в ряде нерудных минералов, где довольно высокое его содержание зафиксировано в гранатах (до 15 %), диопсиде (до 3 %), эгирине, турмалине (6 %), некоторых слюдах (до 11 %).

Хотя ванадий относится к рассеянным редким элементам, в мире известно 4 геолого-промышленных типа собственных ванадиевых месторождений, где он является основным или одним из основных полезных компонентов:

- молибден-уран-ванадиевые и ванадиевые экзогенные;
- метасоматические уран-благороднометалльно-ванадиевые;

Запасы, добыча и производство товарной продукции рассеянных элементов по состоянию на начало 2019 г.

Элемент (учетная форма)	Запасы, тыс. т		Добыча из недр / суммарное производство товарной продукции, т/год	
	Мир (кроме стран СНГ)	Россия	Мир (кроме стран СНГ)	Россия
Ванадий (V ₂ O ₅)	20000–36000	23100	Нет свед. / 80000	75800 / Нет свед.
Скандий (Sc)	Не оценены	13,2	Нет свед.	Нет свед. / 0,2
Галлий (Ga)	1000 (в бокситах)	116,5	410 / 142*	738,2 / 1,5
Гафний (HfO ₂)	1162*	145,8	Нет свед. / 80–110	– / –
Германий (Ge)	22,0	3,55	Нет свед. / 120 (металла)	1,7 / 0,6
Индий (In)	18,8 (в свинцово-цинковых и медных рудах)	5,27	Нет свед. / 750	67 / 7–15
Кадмий (Cd)	500	162	Нет свед. / 24200	18000 / Нет свед.
Рений (Re)	10–15	315,2	49 / Нет свед.	2,6 / –
Рубидий (Rb ₂ O ₃)	90 (оценены частично)	621,8	Нет свед. / п - тонн металла	2528 / –
Селен (Se)	99 (только в медных и свинцово-цинковых рудах)	94,3	Нет свед. / 2800 рафинированного селена	1772,8 / 150
Таллий (Tl)	0,38 (в цинковых рудах)	8,2	8 / Нет свед.	9,4 / –
Теллур (Te)	31 (в медных рудах)	46,9	Нет свед. / 440	747,0 / Нет свед.
Цезий (Cs ₂ O ₃)	90**	88,9	Нет свед. / 120	16,2 / –

* Данные за 2008 г.

** Данные за 2014 г.

- ванадиевые в глинистых корах выветривания щелочных карбонатитов;
- уран-ванадиевые в пестроцветных осадочных породах.

Все они, как правило, мелкие, но с легко обогатимыми рудами, отрабатывались или отрабатываются в зарубежных странах.

Особую группу промышленных объектов попутного ванадия в мире образуют месторождения топливно-энергетического сырья (углеводороды и угли). Ванадийсодержащие углеводороды представлены нефтями, битумами, асфальтитами. Если сырая нефть содержит 0,01-0,3 % V_2O_5 , то ее зола – до первых десятков процентов.

Мировые запасы ванадия в пересчете на V_2O_5 оцениваются разными источниками с большим разбросом (см. таблицу), а ресурсы – в 100-150 млн т. Мировое производство ванадия (кроме СНГ) устойчиво развивается и в 2018 г. составило 80 тыс. т [6]. Ванадий в мире производят из ванадийсодержащих металлургических шлаков (68 %), ванадиевых руд (23 %), нефтяных отходов и вторичного сырья (9 %). При современном уровне использования ресурсного потенциала ванадия достаточно для удовлетворения потребностей мирового рынка в данном металле в течение нескольких столетий [6].

В России основные разведанные запасы, прогнозные ресурсы и добыча ванадия, как и в мире, связаны с рассеянным ванадием, который в виде попутного компонента присутствует в рудах многочисленных комплексных месторождений, включая железо-титановые, железо-медные, титано-фосфорные, молибден-золото-урановые, колчеданно-полиметаллические, бокситовые, коры выветривания редкометалльных карбонатитов и полиметаллических месторождений, аллювиальные и прибрежно-морские россыпи и др. Известно только одно собственно ванадиевое метасоматическое комплексное месторождение – Средняя и Верхняя Падма (не отрабатывается), где содержание пентоксида ванадия в рудах достигает 12,5 %.

В России сосредоточено около 40 % мировых запасов ванадия, она входит в тройку мировых лидеров наряду с ЮАР и Китаем, а его производство составляет 27 % от мирового объема. На начало 2019 г. запасы ванадия российских месторождений учитываются государственным балансом в рудах 26 комплексных месторождений: более 97 % учтенных запасов и 95,5 % производства связано с титаномагнетитовыми рудами [2]. Страна обеспечена ванадиевым сырьем более чем на 100 лет.

Во всем мире возрастает роль техногенного и вторичного ванадиевого сырья. К нему относятся отвальные шламы предприятий, перерабатывающих ванадиевые шлаки (1,2-2 % V_2O_5); отработанные катализаторы сернокислотного производства (9,2 %); зольные остатки ГРЭС, использующих жидкое топливо (до 30 %); хвосты обогащения ванадийсодержащих руд и др. Содержание ванадия в техногенном сырье часто значительно выше, чем в природном [7].

Ванадий – один из главных легирующих металлов, используемых в основном в черной (80-95 %) и реже – в цветной металлургии при производстве различных сплавов для широкого спектра отраслей промышленного производства. Кроме металлургии ванадий применяется в медицине, фармацевтике, обо-

ронной, текстильной, стекольной, лакокрасочной, резиновой промышленности, электротехнике, атомной энергетике, сельском хозяйстве. Промышленное значение имеют как металлический ванадий, так и его многочисленные соединения, а также разнообразные машиностроительные материалы (чугуны, стали и сплавы). Ванадиевые твердые растворы используются в производстве сплавов для хранения водорода. В таком качестве ванадий является объектом интереса во многих странах.

СКАНДИЙ – мягкий, легкий редкий металл, основной формой нахождения которого в природе является рассеяние его в многочисленных породообразующих, рудных, в том числе аксессуарных минералах. К настоящему времени известно более 130 минералов, содержание попутного скандия в которых изменяется от тысячных и менее долей процента до 6 %. Наиболее высокие примеси изоморфного скандия (Sc_2O_3) содержат:

- минералы-оксиды: иксиолит – 5 %, колумбит – 6 %, ильменорутит – 1,2 %;
- силикаты: перьерит – 4,2 %, магбасит – 2,1 %, эгирин – 1 %, берилл – 1,5 %;
- фосфаты: крандаллит – 0,8 %, ксенотим – 1,5 %.

Выявлено также 8 собственных минералов скандия, из которых 6 – силикаты и 2 – фосфаты. Все они очень редки и встречаются, как правило, в виде мелких выделений. Только тортвейтит образует более или менее значительные скопления в гранитных пегматитах и карбонатитах.

Месторождения скандия представлены многочисленными геолого-промышленными типами. Различаются скандийсодержащие и собственно скандиевые месторождения. Месторождения собственных минералов скандия редки и представлены единственным типом – пегматитовыми рудами, где минералом-концентратом является силикат скандия тортвейтит (34-42 % Sc_2O_3). Однако и тортвейтитовые руды в силу ограниченности запасов существенного промышленного значения пока не имеют, хотя отрабатывались за рубежом (Норвегия, Мадагаскар, Япония).

Комплексные скандийсодержащие месторождения можно разделить на 2 группы.

Меньшая из них, но наиболее значимая, представлена объектами, в которых рассеянный скандий сконцентрирован в столь существенных количествах, что является уже не попутным, а одним из основных полезных компонентов. К этой группе относятся месторождения четырех промышленных типов: метасоматические уран-редкометалльно-скандиевый и уран железорудно-скандиевый, скандий-редкоземельно-ниобиевый в переотложенной коре выветривания (КВ) и скандий-урановый.

Большинство скандийсодержащих месторождений содержит рассеянный в разнообразных минералах элемент только как попутный компонент. Спектр геолого-промышленных типов таких месторождений широк, поскольку скандий присутствует в рудах титановых, фосфатных, оловянных, цинковых, железорудных месторождений, в бокситах, редкометалльных карбонатитах, никельсодержащих латеритах, глинах, а также в скоплениях различного техногенного сырья – красных шламах алюминиевого производства, отходах обогащения и переработки железных, ти-

тановых, урановых, оловянных, фосфатных руд; вольфрамовых кеках, золах каменных и бурых углей и битуминозных образований и т.д. [7, 8]. Все техногенные отходы крупнотоннажные и могут служить важным источником получения скандия.

Мировые запасы скандия достоверно не оценены в основном из-за широкой рассеянности элемента в рудах разных типов, однако, его запасы и ресурсы можно считать вполне достаточными для удовлетворения прогнозируемого спроса. Достоверные данные об объемах производства отсутствуют, но по экспертным данным объем мирового рынка скандия в 2015 г. оценивался не менее, чем в 15-20 т, в 2018 г. – 35 т. Представляется, что потребности в скандии в дальнейшем могут возрасти (при условии снижения его стоимости), прежде всего при создании новой авиационной, космической и военной техники.

В России запасы скандия в качестве попутного компонента учтены в рудах 9 месторождений [1]. Из общих запасов на редкометалльные коры выветривания приходится 85 %, бокситы – 7, урановые руды – 4, титаноциркониевые россыпи – 4,1, оловянные руды – менее 0,01 %. Попутная добыча скандия в 2018 г. велась только на Долматовском урановом месторождении и составила 0,2 т оксида скандия в концентрате.

К 1992 г. производство оксида скандия составляло в России около 10 т, но затем резко сократилось и только, начиная с 2008 г., интерес к скандию стал возрастать. Данные о сегодняшнем его использовании не публикуются. Неофициальные прогнозные ресурсы скандия России огромны, и их значительная часть связана с техногенными отходами различных производств. В целом в стране сырьевые источники скандия многочисленны, и в периоды "скандиевых бумов", имевших место в СССР в конце 1950-х – начале 1960-х гг. и второй половине 1980-х гг., было доказано, что его производство может быть быстро налажено из разнообразного сырья [7, 8].

В настоящее время в России рассматриваются 5 проектов по производству скандия:

- извлечение из красных шламов глиноземных предприятий Урала;
- получение скандия из пироксенитовых хвостов АО "ЕВРАЗ Качканарский ГОК";
- разработка Томторского редкометалльного месторождения;
- разработка Хиагдинского и Долматовского урановых месторождений;
- извлечение из техногенных отходов предприятия "Крымский титан", накопленных в процессе переработки на пигмент ильменитовых концентратов.

Скандий – один из самых дорогих редких металлов с малым объемом производства и потребления. В мировой промышленности он применяется в виде чистого металла, различных сплавов и химических соединений. Области применения скандия быстро расширяются, но пока ограничены из-за его дороговизны, обусловленной технологическими сложностями получения. Наиболее емкие области применения скандия: алюминий-скандиевые и титан-скандиевые сплавы и лигатуры, топливные элементы с твердым электролитом, атомная, водородная и солнечная

энергетика, космическая и военная техника, авиация, металлургия, электроника, лазерная техника, МГД-генераторы, рентгеновские зеркала, огнеупорные материалы, медицина, изотопы и люминофоры, катализаторы, источники света, спецсварка, спецкерамика, спорттовары повышенной прочности и др.

ГАЛЛИЙ – токсичный, мягкий металл, типичный рассеянный элемент. Он не образует собственных месторождений, его запасы оцениваются по среднему содержанию в разрабатываемых галлийсодержащих рудах. К настоящему времени известно 5 собственных минералов галлия, обнаруженных на уникальных германий-полиметаллических месторождениях Цумб (Намибия) и Кипуши (Конго), но практического значения они не имеют.

Галлий встречается во многих минералах в качестве незначительной изоморфной примеси, но на этом фоне выделяются некоторые силикаты, сульфиды, оксиды и сульфаты, в которых примесь галлия повышена и составляет (%): в нефелине – 0,01-0,04, сфалерите, лепидолите, ставролите – до 0,15, германите – 0,34-1,85, касситерите – до 0,32, ярозите – до 0,7, бемите и гиббсите – до 0,006. Повышенные концентрации галлия наблюдаются также в каменных углях. В колошниковых пылях от сжигания таких углей содержится до 1,5 % галлия.

К основным галлийсодержащим месторождениям относятся осадочно-латеритные бокситы, которые и являются реально используемым сырьем для получения галлия, и апатит-нефелиновые руды. Меньшее значение имеют сульфидные руды медно-колчеданных, полиметаллических и свинцово-цинковых месторождений. В перечисленных типах руд сосредоточено подавляющее количество галлия в мире. В процессе передела таких руд галлий накапливается в продуктах и полупродуктах их технологической переработки.

К второстепенным источникам относят угли, фосфатные руды, медистые песчаники и сланцы. Руды второстепенных видов сырья галлия использовались или используются в небольших масштабах в странах, где существуют технологические схемы его извлечения.

Мировые запасы галлия в целом не оценены. Локально определенные запасы галлия [6], связанные с месторождениями бокситов, не отражают реальной картины. Поскольку запасы бокситов огромны, значительная их часть не будет добываться еще в течение многих десятилетий. Следовательно, в краткосрочной перспективе не будет доступа и к содержащемуся в них галлию.

В 2018 г. мировое производство первичного галлия оценивалось Геологической службой США в 410 т. Доля вторичного галлия, дополнительно получаемого при переработке лома, в мировом производстве может достигать 50 %. С 1990-х гг. мировой спрос на галлий устойчиво растет [6], в 2014 г. он составил 280 т. Ожидается увеличение потребления галлия в связи с переходом с производства ламп накаливания и люминесцентных на светодиодные (LED) [9, 10].

В России запасы галлия учитываются в комплексных месторождениях апатит-нефелиновых, бокситовых, медно-колчеданных, полиметаллических, свинцово-цинковых руд и нефелиновых сиенитов (см. таблицу). На апатит-нефелиновые руды приходит-

ся 73,3 % от общего количества галлия в России и почти 94 % его добычи [1]. В товарную продукцию полезное ископаемое не извлекается.

Крупнейший производитель галлия в России – холдинг "Русал", предприятия которого извлекали галлий из отечественных и привозных бокситов, уртитов, а также нефелиновых концентратов, получаемых при обогащении апатит-нефелиновых руд Мурманской области. Суммарно все предприятия холдинга могут производить свыше 20 т галлия в год. В настоящее время относительно достоверная информация имеется только о работе Ачинского глиноземного комбината с производственной мощностью 1,5 т галлия в год, где галлий извлекается в товарную продукцию из не учтенных государственным балансом запасов в составе уртитов Кия-Шалтырского месторождения Красноярского края.

До 1960-х гг. спросом пользовался преимущественно металлический галлий чистотой 99,9 %, и долгое время его потребление было незначительным. Спрос вырос в начале 2000-х гг., когда началось производство интегральных схем для систем волоконно-оптических линий связи. Полупроводниковая электроника – основная область применения галлия – поглощает более 90 % его производства. Арсенид галлия занимает 3-е место после кремния и германия по объему в производстве полупроводниковых соединений. Полупроводники на его основе применяются в высокоскоростных компьютерах, сотовых телефонах, волоконно-оптических линиях связи, коммуникационных устройствах, солнечных батареях, оборудовании спутниковой связи. Большие перспективы связывают с применением галлия в конструкции солнечных батарей. Прочие области применения галлия: производство легкоплавких сплавов для изготовления терморегуляторов, гидравлических затворов, припоев "холодной пайки" и др.

ГАФНИЙ – твердый и тугоплавкий металл, который встречается в рассеянном состоянии только в минералах циркония, с которым находится в тесном геохимическом родстве. Главный минерал-концентрат изоморфного гафния – циркон, в составе которого гафний присутствует во многих акцессорных и породообразующих минералах. Собственный минерал гафния – гафнон является минералогической редкостью.

Основным геолого-промышленным типом месторождений циркония и гафния в мире являются титаноциркониевые прибрежно-морские россыпи, на которые приходится более 95 % мирового производства циркония и практически все производство гафния. Цирконовые концентраты – единственный источник получения гафния, содержащие 0,5-2,0 % оксида гафния. Гафний получают как попутный продукт при производстве реакторного металлического циркония, для чего используется не более 3 % добываемого в мире циркона [1].

Подтвержденные запасы оксида гафния за рубежом (по его содержанию в запасах циркона) в 2008 г. превышали 1 млн т Hf_2O (см. таблицу) [6].

В России основные запасы оксида гафния (около 84 %) в качестве попутного компонента учитываются в рудах коренного Улуг-Танзекского месторождения при среднем содержании 0,169 г/т

и в песках двух титаноциркониевых месторождений – Туганского (211 г/м³) и Лукояновского (131 г/м³) [1]. В настоящее время гафний в стране не производится. Отметим, что в случае возникновения потребности в гафнии наиболее вероятно его извлечение из цирконовых концентратов россыпных объектов, в частности из концентратов Туганского месторождения, на котором проведена опытная отработка, и объект подготавливается к освоению.

Гафний является одним из самых сильных поглотителей нейтронов и поэтому используется в ядерной технике для создания регулирующих стержней атомных реакторов на тепловых нейтронах, а также для сооружения защитных оболочек. Более половины (54 %) выпускаемого в мире гафния используется в производстве суперсплавов, главным образом, на основе никеля, 14 % идет на изготовление электродов для плазменной резки металлов, 11 % – в виде оксида гафния в оптике, 7 % – при производстве износостойчивых покрытий и примерно столько же находит применение в атомных реакторах. На протяжении последних 30 лет мировое производство гафния колебалось в пределах 70-110 т [11], потребление в 2017 г. составило 66 т [12].

германий – редкий металл, в основном попутного производства. Он преимущественно рассеян в минералах и рудах сходных с ним элементов, но образует и собственные месторождения и является одним из наиболее распространенных рассеянных редких элементов.

Собственные минералы германия редки. Чаще других встречаются сульфиды – германит (8-11 % Ge), реньерит (6-8 %), аргиродит (5-7 %) канфильдит (1-2 %).

Германий установлен в сульфидных минералах цветных и черных металлов, в некоторых оксидных минералах (хромите, рутиле и др.), в месторождениях бурого и каменного угля и нефти, присутствует изоморфно почти во всех силикатах. Так, в количестве до 0,01 % он входит в состав топаза, литийсодержащих слюд, сподумена, турмалина и др. Главным рудным минералом-концентратом германия является сфалерит (до 3 кг/т Ge).

К основным промышленным типам германийсодержащих месторождений, используемых для извлечения германия в настоящее время, можно отнести только два типа: германий-буроугольный и свинцово-цинковый стратиформный.

Мировые запасы германия не оценены. Для северной Америки, ряда стран Европы и Африки основным источником получения германия служат цинковые руды, в которых его запасы определены в известной мере условно [6, 13].

Промышленное производство германия за рубежом традиционно основывалось на попутном его получении из побочных продуктов переработки руд цветных металлов (германийсодержащих концентратов – цинковых, реже медных и свинцовых). Обычно используемые в промышленности сульфидные концентраты содержат германий в количестве: цинковые – 80-300 г/т, медные – 70-80 г/т, свинцовые – 2-20 г/т. В последние десятилетия в качестве сырья для получения германия на ведущие мировые позиции выходят золы от сжигания угля (Китай). Содержа-

ние германия в золах многократно повышается по сравнению с исходным углем и составляет порядка первых килограммов на тонну [13].

Потребление германия в мире развивается неравномерно. В некоторых отраслях рост его потребления в отдельные годы превышал 10 %. В начале 2000-х гг. мировое производство германия достигало 85-105 т/год. При этом около 35 % потребляемого германия производилось из вторичного сырья [13]. За последние 10 лет мировое потребление германия увеличилось в 1,5 раза, в 2017 г. составило 120 т [6] и, по всей вероятности, будет расти [12].

В России на 01.01.2019 государственным балансом запасы германия в качестве попутного компонента учтены в рудах 19 месторождений – буроугольных (67,2 %), каменноугольных (23,9 %), медно-колчеданных, магнетитовом и в различных углистых породах [1].

Разрабатывается на германий одно буроугольное месторождение в Приморском крае – Павловское, где германий извлекается из зол от сжигания углей. В 2018 г. здесь было добыто 0,6 т германия. Золоконцентрат германия перерабатывается с получением товарной германиевой продукции на нескольких предприятиях страны. Так, в Новомосковске размещено высокотехнологичное производство электронно-оптических компонентов, где ожидаемый объем производства германиевой оптики к 2020 г. должен был составить 14 т. В Красноярске ОАО "Германий" выпускает поли- и монокристаллический германий, диоксид германия, германат натрия и тетрагидрид германия. Производственные мощности предприятия в пересчете на германий – порядка 20 т в год. В настоящее время 80 % деятельности предприятия направлено на работу с иностранными партнерами. Производством германийсодержащей продукции занимаются еще несколько мелких предприятий в Новосибирске, Твери, Москве.

Германий – один из важнейших стратегических редких металлов. Впервые он был использован около полувека назад как полупроводниковый материал для транзисторов. Сегодня сфера его применения охватывает наукоемкие технологии, связанные с космическими исследованиями, волоконно-оптическими средствами связи, инфракрасной техникой и тепловидением, катализаторами, люминофорами в лампах дневного света, медициной, фармацевтической, электронной и электротехнической промышленностью. Германий и его соединения – перспективный материал для солнечных элементов космического назначения, специальной металлургии. Активно развивается германийорганическая химия – производство лекарств, пищевых добавок.

Доступная оценка видимого потребления германия в России находится на уровне 6,5 т. Основные области потребления германия – инфракрасная оптика и электроника. Некоторая часть товарной германиевой продукции приходится на трудно оцениваемый скрытый импорт в готовых изделиях. Не исключено, что большая часть германия остается в госрезерве или используется в оборонной промышленности. Оценить истинный баланс спроса и предложения германия в России на текущий момент не представляется возможным.

ИНДИЙ – мягкий, ковкий, легкоплавкий относительно молодой промышленный металл. Широкое использование металлического индия и его соединений началось только в конце 1970-х гг.

Минералы-носители индия многочисленны, однако он содержится в них в большинстве случаев не более нескольких тысячных долей процента.

Известно пока только 7 собственно индиевых минералов: 1 самородный индий, 5 сульфидов, 1 гидроксид. Все они чрезвычайно редки, имеют ультрамикроскопический размер и практического интереса не представляют.

Индий – типичный рассеянный элемент и собственных месторождений не образует. За рубежом промышленно ценными на индий считаются руды с содержанием 20 г/т. Однако практически любые количества индия могут быть извлечены, если они заключены в минералах, которые перерабатываются по схемам, допускающим концентрацию индия в продуктах передела до промышленного содержания. Среди всех минералов-концентратов индия, содержащих его в виде изоморфной примеси, к промышленно важным относятся сфалерит, галенит, халькопирит и касситерит, из которых наиболее значимым является сфалерит, содержащий индий в количестве 0,1-1 %. Наиболее богаты индием свинцово-цинковые месторождения с повышенным содержанием олова (оловянно-полиметаллические).

Мировые запасы индия, по данным Европейской комиссии, определены в медных и свинцово-цинковых рудах, являющихся основным источником его получения, в них же оценены ресурсы в количестве 95 тыс. т [11, 12]. С учетом оловянных, полиметаллических и других руд суммарная оценка мировых запасов индия может возрасти. В мире производство индия в период 2003-2018 гг. устойчиво росло, достигнув 750 т, причем более 60 % металла произведено из вторичного сырья [6].

Индий непосредственно из природных руд получить невозможно. Сырьем для его извлечения служат продукты переработки цинковых, свинцовых, оловянных, медных концентратов, в процессе металлургического передела которых получают продукты, являющиеся технологическим сырьем для извлечения из них индийсодержащих товарных продуктов.

Минерально-сырьевая база индия России включает запасы 60 месторождений, в рудах которых он присутствует в качестве попутного компонента [1]. Основная роль принадлежит медно-цинковым рудам медно-колчеданных месторождений, на которые приходится почти 67 % запасов индия, на 2-м месте – оловянные и оловянно-полиметаллические месторождения, содержащие около 32 % суммарных запасов. В настоящее время основным источником индия являются цинковые и медные концентраты.

Суммарные сведения о производстве товарной индийсодержащей продукции в РФ отсутствуют. Имеется информация о том, что ежегодное производство индия на Челябинском цинковом заводе составляет от 7 до 15 т. Большая часть продукции (от 5 до 7,2 т) экспортируется в США, Великобританию и Китай.

До начала 1990-х гг. Россия была в числе ведущих потребителей индия в мире (25-35 т/год). В настоящее время объем спроса внутреннего российского рынка не превышает 2 т (по дру-

гим данным – 0,5 т). В перспективе и с учетом импортозамещения потребности страны в индии, прежде всего для производства индий-олово-оксидных покрытий (ИТО), могут возрасти многократно.

Минерально-сырьевая база индия в России в настоящее время не испытывает проблем, но медно-цинковые руды медно-колчеданных месторождений, из которых получается содержащий индий цинковый концентрат, активно отрабатываются, а значительная часть других месторождений, состоящих на балансе, по разным причинам нерентабельна. При этом по прогнозам ведущих исследователей мирового рынка металлов, прирост потребления цинка планируется в пределах 1-2 %, а индия – 15-20 %, т.е. рост добычи основных цинксодержащих руд не обеспечит рост производства индия.

Структура мирового потребления индия за последние 20 лет существенно изменилась. Полупроводниковые соединения индия, применяемые главным образом в военной технике, уступили место индий-олово-оксидным покрытиям (ИТО) в производстве экранов ЖКД, мониторов компьютеров, электролюминесцентных ламп, электродов токопроводящих элементов и др. В суммарном объеме на ИТО приходится 70-75 % мирового потребления, остальная часть расходуется на припои и сплавы, полупроводниковые соединения и энергетику. Развитие фотогальванических технологий и производства солнечных батарей представляет собой новый растущий сектор потребления индия. Также ожидается использование соединений индия в конструкции будущих компьютерных чипов.

КАДМИЙ – мягкий ковкий, тягучий металл, высокотоксичный и обладающий канцерогенными свойствами. Кадмий не имеет собственных месторождений и содержится в виде изоморфной примеси во многих рудных и породообразующих минералах и практически всегда в минералах цинка с концентрацией в зависимости от минерального типа месторождений от 0,01 до 3 %. Известно всего 6 кадмиевых минералов, все они относятся к редким и весьма редким, образуют микровключения, тончайшие примазки, присыпки в обогащенных ими породах и в настоящее время не имеют практического значения. Единственный минерал кадмия, представляющий некоторый интерес – гринокит (кадмиевая обманка), при разработке месторождений цинковых руд добывается вместе со сфалеритом и попадает на цинковые заводы.

Повышенные количества рассеянного кадмия отмечаются во многих сульфидах, в халькопирите (до 0,12 %), станнине (0,2 %), тетраэдрите (1,97 %), теннантите (0,2 %), халькозине (0,3 %), борните (0,1 %), а также в киновари, галените (0,2 %), пирите (до 0,02 %). Кадмий присутствует в виде примеси во многих других породообразующих и рудных минералах – силикатах, оксидах, сульфатах, фосфатах, глинах и др., где его содержание изменяется от сотых до первых процентов. В небольших концентрациях кадмий встречается в каменных углях (при повышенном содержании в них цинка), также в нефтях некоторых месторождений. Главные минералы-концентраты кадмия в рудах и основные источники промышленного получения – сульфиды цинка (сфалерит и вюрцит). В качестве попутного полезного компонента

кадмий присутствует в концентрациях, представляющих промышленный интерес, в рудах свинцово-цинковых и колчеданно-полиметаллических месторождений, большинстве медно-колчеданных и оловянно-свинцово-цинковых и ряде других, содержащих цинк. При этом для кадмия, как и для других металлов попутного производства, источниками извлечения являются не исходные руды, а продукты гидро- и пирометаллургического передела концентратов, содержащих попутный кадмий.

Общие мировые запасы кадмия (см. таблицу) рассчитываются по запасам цинковых руд, где его содержание в среднем составляет 0,03 % [6].

Мировое производство кадмия в 2018 г. составило около 24,2 тыс. т, из которых на вторичное производство (в основном за счет отработанных никель-кадмиевых батарей) пришлось около 20 %. Мировое потребление кадмия в 2018 г. оценивалось в 21,3 тыс. т [14].

В РФ запасы кадмия по состоянию на 01.01.2019 учтены в рудах 101 месторождения (из них 6 с забалансовыми рудами), из которых 38,2 % от общих запасов заключено в колчеданно-полиметаллических, 29,4 % – медно-колчеданных и 29,3 % – свинцово-цинковых и свинцовых месторождениях [3]. Из недр было добыто около 1,8 тыс. т металла. При обогащении руд кадмий накапливается в основном в цинковом и частично в медном, пиритном и свинцовом концентратах. Кроме того, кадмий накапливается в отвальных хвостах обогатительных фабрик.

Извлечение кадмия в процессе металлургического передела из цинковых концентратов составляет 82-85 %, из свинцовых и медных – около 35 %. Получаемая при этом конечная товарная продукция представляет металлический кадмий по ГОСТу 1467-93 (Челябинский цинковый завод) и чушковой кадмий (Cd не менее 99,96 %) по ГОСТ 1467-97 – ОАО "Электроцинк" (до 2019 г.).

Металлический кадмий и его соли широко применяют в металлургии, атомной, ювелирной, военной, химической, медицинской, стекольной, полупроводниковой и других отраслях промышленности. Кадмий применяется также при создании антифрикционных сплавов, фотоэлектрических и электронно-оптических приборов, фотоэлементов и аккумуляторных батарей.

Ввиду незаменимости свойств соединений кадмия, несмотря на его токсичность, уровень мирового промышленного использования этих соединений составляет более 19 тыс. т, и тенденции к его значительному сокращению пока не наблюдается. Наибольшее количество кадмия идет в качестве сырья для производства никель-кадмиевых батарей (аккумуляторов), как бытовых, так и промышленных. После введения ограничений на производство никель-кадмиевых источников питания в Европе общее потребление кадмия может сократиться на 30 % [11].

РЕНИЙ – малораспространенный переходный металл. В рассеянном состоянии встречается в минералах широкого спектра – от повсеместно распространенного пирита до редких платиновых руд, а также рассеян в бурых углях, горючих сланцах, нефти и лишь в единичных случаях образует самостоятельные месторождения. Форма нахождения рения в молибдените, халькопирите и других рудных минералах разнообразна: обычны изоморфные

замещения, реже твердые минеральные включения, пленочные и другие трудно- и легкорастворимые формы.

Собственные минералы рения (известно всего 4) не имеют практического значения, не образуют значимых концентраций, встречаясь в виде редких микроскопических включений в поро-до- и рудообразующих минералах меди, молибдена и др., и не могут быть извлечены в рениевый концентрат.

Главным минералом-концентратором рения и основным природным источником его попутного промышленного производства является молибденит, в котором он содержится от 18 до 700 г/т. Основные типы месторождений, используемых для извлечения рения, – молибденовые и медно-порфиновые месторождения, медистые песчаники и сланцы. Руды медно-колчеданных, колчеданно-полиметаллических и полиметаллических свинцово-цинковых месторождений содержат рений в существенно меньшей концентрации. В последние годы было выявлено обогащение рением руд мышьяково-медно-полиметаллических месторождений, в которых концентрируется германий. Месторождения Кипуши (Республика Конго) и Цумб (Намибия) стали крупным сырьевым источником попутного рения.

Рений содержится в рудном комплексном сырье, в котором он не является основным компонентом, с чем связаны большие потери металла, превышающие 60-90 %. Основные сырьевые источники рения – молибденитовые концентраты (0,01-0,04 % Re), медные концентраты ряда месторождений (0,002-0,003 % Re), отходы от переработки медистых сланцев, свинцово-цинковые пыли (0,04 % Re), а также сбросные воды при гидрометаллургической переработке бедных молибденитовых концентратов (10-50 мг/л Re) [11].

По оценкам Геологической службы США, из подтвержденных мировых запасов рения (см. таблицу), "извлекаемые" запасы оцениваются всего в 2,4 тыс. т; выявленные ресурсы рения – 11 тыс. т. Мировая добыча рения оценивается по его количеству, извлеченному в медные и молибденовые концентраты. Мировое потребление рения в 2018 г. составило 75 т [6, 15].

Доля России в мировых запасах рения незначительна и оценивается в 3 %. По состоянию на 01.01.2019 они учтены в 9 коренных месторождениях [1]. В качестве основного компонента элемент учитывается на рениевом комплексном Брикетно-Желтухинском месторождении (7,2 % общих запасов), где попутными являются уран и молибден. Попутно рений учтен в 4 молибденовых, 3 медно-порфиновых (84,2 %) и вольфрам-молибденовых месторождениях. Кроме того, на вулкане Кудрявый известны динамические запасы рения категории С₂ в вулканических газах в количестве 36,7 т/год, но проблемы возможности их использования пока не решены. Разрабатываются молибденовое Сорское и медно-молибденовое Михеевское месторождения, из руд которых рений пока не получают.

Обеспеченность всеми балансовыми запасами рения по прогнозируемой внутренней потребности превышает 50 лет, но в настоящее время рений не извлекается.

Являясь одним из наиболее тугоплавких и химически стойких металлов, рений практически не имеет аналогов в нефтехимии,

при производстве авиационной, ракетно-космической, газотурбинной техники, в силовой электротехнике. Более 70 % суммарного потребления металла используется в металлургии для производства суперсплавов. Рений и его соединения обладают каталитическими свойствами, имеющими широкое применение в органической химии. Электротехника, электроника, специальное приборостроение – также традиционные области применения рения. Мировые и российский потребности в рении стабильно растут. В освоение вовлекаются все новые источники, требующие часто нетрадиционных решений по извлечению металла.

РУБИДИЙ – щелочной мягкий металл. Собственных минералов и месторождений рубидий не образует. Для него характерно рассеяние в кристаллических структурах преимущественно калиевых минералов. В промышленных редкометаллических пегматитах высоким содержанием рубидия (1,7-4,5 %) отличаются рубидиевый микроклин, рубидиевые лепидолит, мусковит и разновидность мусковита – фенгит. До 1,2 % оксида рубидия содержится в поллците, повышенные его количества отмечаются в берилле (до 4,2 %), альбите (до 0,39 %), турмалине (0,05-0,1 %). Также концентраторами рубидия являются литиевые слюды – лепидолит, циннвальдит, мусковит, биотит и эфесит. Значительные скопления рубидия связаны с нефелином (апатит-нефелиновые руды) и карналлитом, однако содержания рубидия в них невысоки (в среднем 0,01-0,02 %).

По промышленному значению и минеральному составу, определяющему технологию переработки сырья и качество получаемых концентратов, среди руд, содержащих рубидий, выделяются комплексные цезий-рубидиевые и рубидийсодержащие минеральные разновидности. К комплексному цезий-рубидиевому типу относят руды редкометаллических грейзенов, а также слюдяные концентраты, попутно получаемые при флотационном обогащении редкометаллических литиеносных пегматитов. По содержанию оксида рубидия (от 1,5 до 4,5 %) – это наиболее ценный вид рубидиевого сырья.

К рубидийсодержащему типу руд относят апатит-нефелиновые руды и карналлиты, которые отличаются крупными запасами рубидия при низких его содержаниях, что предполагает использование их только в качестве дополнительных источников добычи рубидия.

Мировые запасы рубидия, оцененные Геологической службой США [6], приведены в таблице. Ориентировочные подсчеты по содержанию рубидия в лепидолите из комплексных редкометаллических пегматитов позволили оценить ресурсы оксида рубидия в 170 тыс. т. Кроме того, по некоторым оценкам в рапе Мертвого моря содержится около 57 млн т рубидия, в отложениях калийных солей Франции, Германии и США – 30 тыс. т рубидия со средним содержанием оксида рубидия 0,001-0,01 % [11].

Добыча рубидия осуществляется попутно из лепидолитовых, в меньшей мере из поллцитовых концентратов, получаемых при отработке и обогащении литий-бериллий-танталовых пегматитовых месторождений. Мировое производство металлического рубидия составляет несколько тонн в год. Данные по потреблению рубидиевой продукции не публикуются.

Государственным балансом запасов в России по состоянию на 01.01.2019 учтены запасы попутного оксида рубидия в 18 месторождениях, в том числе (%): в апатит-нефелиновых и нефелиновых рудах (54,7), редкометалльных пегматитах (39,0), редкометалльно-флюоритовых рудах (5,9), карналлитовых породах (0,4) [1]. Все месторождения являются комплексными и рубидий в них – попутный компонент.

До недавнего времени в России промышленным сырьем для получения рубидия служили импортные поллуцитовые концентраты, содержащие 0,2-0,8 % оксида рубидия. В стране в начале 1990-х гг. потреблялись первые сотни килограммов рубидия. В настоящее время его внутреннее потребление практически сведено к нулю, и нет реальных предпосылок к изменению ситуации в обозримом будущем.

При эксплуатации месторождений с рубидием, состоящих на государственном балансе, металл не извлекается и полностью теряется в отходах производства. В отдельные годы потери оксида рубидия доходили до 5000 т. Сейчас производство рубидиевой продукции в России из отечественного сырья отсутствует. На предприятиях, ранее выпускавших товарную рубидиевую продукцию (Новосибирский завод редких металлов, Красноярский ХМЗ, ОАО "Севредмет", ИХТРЭМС КН РАН), имеются ее нереализованные запасы [11].

Области применения рубидия – электронная, химическая промышленность, фармацевтика, медицина, специальная металлургия. Он также используется при изготовлении специальной оптики, в том числе приборов ночного видения, стандартов для атомно-абсорбционного анализа, неорганических химикатов.

СЕЛЕН – рассеянный элемент со свойствами полуметалла, за единичными исключениями не образующий собственных месторождений и в виде попутного компонента изоморфно накапливающийся в рудах сульфидных месторождений, которые являются традиционными источниками его получения. Собственно селенидные месторождения типа Пакахака (клаусталит и др.) имеются в Боливии [16].

Известно более 80 минералов селена. Все они редкие или очень редкие. Среди селенидов (69 минералов) более половины – медные и никелевые. Остальные представлены сульфоселенидами. Уровень средних содержаний селена в главных рудообразующих сульфидах (минералах-концентраторах) составляет (г/т): халькопирит – 86, пирит – 61, галенит – 55, сфалерит – 10, пирротин – 45, молибденит и пентландит – 110, борнит – 45, халькозин – 26.

Селен добывается попутно из рудных месторождений широкого минерального спектра при их комплексном использовании, но почти все производство и основные активные запасы селена приходятся на различные типы медных, медно-никелевых и свинцово-цинковых месторождений. Различные медные месторождения – наиболее освоенный вид селенового сырья, который дает основное количество продукции и содержит подавляющую часть запасов селена.

Подтвержденные *мировые запасы селена* (см. таблицу), учитываются практически только в медных и свинцово-цинковых мес-

торождениях. Извлекаемые запасы на начало 2015 г. составляли 124 тыс. т [6].

Ресурсы селена в различных видах минерального сырья более чем в 100 раз превосходят его подтвержденные запасы в рудных месторождениях [11].

Извлечение селена из рудного сырья на предприятиях Японии, Бельгии, Канады, США, Германии и России обеспечивает более 86 % его мирового производства, которое в 2018 г. превысило 2800 т рафинированного селена [6].

Мировое потребление селена обычно оценивается на уровне его суммарного производства (рафинированного плюс вторичного) и в 2008-2012 гг. составляло 3,4-3,8 тыс. т в год.

В России запасы селена в качестве попутного компонента учтены в рудах 74 месторождений [1]. Большая часть запасов сосредоточена в медно-колчеданных (58,4 %), сульфидных медно-никелевых (35,2 %) и полиметаллических рудах (4,7 %), с которыми связано более 98 % его добычи. В процессе металлургической переработки концентратов, полученных при обогащении различных типов медных руд, попутно (из анодных шламов) извлекается селен вместе с теллуром и благородными металлами.

Ни по соотношению годового производства (около 150 т) и потребления (55 т), ни по состоянию минерально-сырьевой базы селен в России в настоящее время и в перспективе не является дефицитным металлом. Качество запасов селена в России выше, чем за рубежом, так как его концентрация в анодных шламах рафинирования черновой меди и черного никеля, извлекаемых из руд медно-колчеданных месторождений, в 3-5 раз выше, чем из медно-порфириновых руд. Обеспеченность России запасами селена по современному уровню его потребления высокая; в 2013 г. экспорт селеновой продукции (более 150 т) превысил ее импорт (15 т) более чем на порядок.

В перспективе, в случае внедрения новой технологии получения меди, которая не подразумевает образования электролитных шламов, содержащих селен, возможно сокращение объема его производства. За рубежом это уже приводит к сокращению производства селена.

Основные области применения селена – металлургия, производство стекла, химические соединения и пигменты, электроника, сельское хозяйство, медицина и другие области, в том числе производство фоторецепторов, фотоэлектрических и солнечных элементов, ИК-техники. Селен является важным микроэлементом для жизнедеятельности человека и животных. Недостаток селена в организме человека увеличивает риск сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний и др. В ряде стран мира приняты государственные программы, стимулирующие выпуск и использование селеносодержащих добавок в пищу, корма, ветеринарные препараты и витамины. На эти добавки и минеральные удобрения в мире ежегодно расходуется свыше 5 % производимого селена [11].

ТАЛЛИЙ – рассеянный, сильно токсичный металл, высокотоксичны и его соединения. Широкая распространенность таллия в объектах литосферы связана с его изоморфным вхождением во многие породообразующие и рудообразующие минералы.

Известно 36 собственных минералов таллия, но они редки, установлены в очень малых количествах на некоторых месторождениях мышьяково-сурьмяных и золото-мышьяковых руд и не имеют промышленного значения.

Среди множества минералов, содержащих рассеянную примесь таллия, практическое значение имеют только некоторые рудообразующие минералы: сульфиды (сфалерит, галенит и пирит), сульфосоли свинца и меди. Самое высокое среднее содержание таллия (16 г/т) установлено для сфалерита и вюртцита, в пирите, марказите, галените его содержание ограничено (5-7 г/т).

Таллий собственных месторождений не образует. В качестве попутного полезного компонента он наиболее характерен для сульфидных свинцово-цинковых и медно-колчеданных месторождений при среднем содержании не более 25 г/т. Значительные количества таллия (50-100 г/т) связаны с серицитом и хлоритом в гидротермально измененных породах, вмещающих месторождения сульфидного типа.

Таллийсодержащим сырьем, перерабатываемым в промышленных масштабах на металлургических и химических заводах, являются цинковые, свинцовые, медные и пиритные концентраты. Небольшие количества таллия поступают с золото- и серебросодержащими концентратами, перерабатываемыми пирометаллургическим способом совместно с медными и свинцовыми концентратами.

Сырьевая база таллия за рубежом мало изучена, и сведения о ней крайне ограничены. *Мировые подтвержденные запасы таллия*, частично включающие условно рентабельные ресурсы, а также уровень его добычи, оцениваемые Геологической службы США, приведены в таблице. Мировые ресурсы таллия, содержащиеся в цинковой руде, составляют приблизительно 17 тыс. т, в угле – 630 тыс. т. Конечными таллиевыми продуктами являются сульфат (порошок) и металлический таллий (слитки, прутки, проволока). Мировое потребление таллия в период 2000-2004 г. сократилось с 15 до 10 т.

Россия обладает крупными суммарными запасами таллия, которые учитываются в рудах 3 полиметаллических (98,7 %) и 7 медно-колчеданных месторождений [1]. Таллий в стране никогда не производился и не производится. При необходимости организация его производства возможна на Челябинском цинковом заводе, однако налаживать производство этого токсичного металла в России при небольшом объеме потребления нецелесообразно.

Основная область применения таллия – электроника (70 %), где он используется в полупроводниковых материалах широкого назначения. Он востребован в фармацевтической промышленности, инфракрасной оптике при изготовлении стекла, в производстве красителей, при изготовлении низкотемпературных термодар, в подшипниках, при электролизе меди, при производстве серной кислоты (в качестве катализатора). Радиоизотопы таллия применяются в медицине для диагностических целей, в контрольно-измерительной аппаратуре. Таллий используется и как металл в составе сплавов, применяемых в ядерной физике, детекторах для телескопов, усилителях для химических лазеров, оптоволоконной технике и т.д.

ТЕЛЛУР – рассеянный элемент – полуметалл с более выраженными металлическими свойствами, чем у его аналогов по группе (селена и серы).

Известно более 100 минералов теллура. Большею частью это теллуриды тяжелых металлов, которые встречаются достаточно широко, но не образуют промышленных скоплений. Основные минералы-концентраты теллура – сульфиды меди, цинка, свинца, никеля, железа, молибдена, в которых обнаруживают как изоморфные примеси элемента, так и микровключения теллуридов. Теллур не образует самостоятельных месторождений и добывается попутно из рудных месторождений широкого минерального спектра.

Основные активные запасы теллура приходятся на медные, свинцово-цинковые и никелевые месторождения, а также на некоторые месторождения благородных металлов. На 1-м месте по запасам и добыче теллура стоят медные месторождения, из которых производится больше половины получаемого в мире теллура.

Самыми богатыми теллуром являются руды медно-колчеданных (2-114 г/т) и колчеданно-полиметаллических (4-47 г/т) месторождений, в других типах руд содержание теллура в большинстве случаев не выше 10 г/т. При обогащении руд теллуросодержащие сульфидные минералы извлекаются в соответствующие концентраты, при переработке которых попутно извлекается теллур. Медные концентраты этих руд наиболее богаты теллуром (15-180 г/т). При их металлургической переработке 45-55 % теллура извлекается в черновую медь, при рафинировании которой теллур вместе с селеном и благородными металлами практически полностью переходит в анодную медь, а затем в анодные шламы электролитического рафинирования меди – основное сырье для производства товарного теллура.

Мировые извлекаемые запасы теллура, учтенные только в медных месторождениях, приведены в таблице. Ежегодно в мире потребляется около 400 т теллура [6].

В России суммарные запасы теллура учтены в качестве попутного компонента в рудах 70 месторождений [1], в основном в медно-колчеданных (70,4 %) и сульфидных медно-никелевых (28,4 %).

Потребление теллура составляет порядка 10 т/год, тогда как до 1990 г. – до 80 т [11]. Россия является одновременно импортером и экспортером теллура. Годовой импорт теллура в период 2008-2012 гг. изменялся от десятков килограммов до 1,1 т, а экспорт – от 18 до 33 т.

Обеспеченность России запасами теллура по современному уровню потребления высокая. Однако, как и в ситуации с селеном, внедрение новой технологии производства меди, которая не подразумевает образования электролитных шламов с селеном и теллуrom, за рубежом уже приводит к сокращению производства теллура при увеличивающемся спросе. Таким образом, проблемы обеспечения страны теллуrom, особенно с учетом ее экспортных интересов, в ближайшие 15-20 лет не исключены.

Основная сфера потребления теллура – черная, в меньшей мере – цветная металлургия. Теллур используется также в хими-

ческой и стекольной промышленности, в электронике и электротехнике в виде полупроводниковых соединений на основе высокоочищенного элемента. Теллуриды представляют ценный материал для инфракрасной техники, оптоэлектроники, гелиоэнергетики. Особенно ценным является применение соединений теллура в приборах ночного видения.

ЦЕЗИЙ – тяжелый щелочной металл, имеющий радиоактивный изотоп и собственные минералы, образующие промышленные скопления.

Известно 15 собственных минералов цезия – 8 силикатов и алюмосиликатов, 3 оксида, а также ванадат, сульфид, фторборат и борат. Наиболее высокие содержания оксида цезия характерны для поллуцита (25,7-36,1 %), нанпингита (25,3 %) и маргаритасита (18,7-19,7 %), но только поллуцит образует промышленно значимые скопления в редкометалльных пегматитах с комплексной Ta-Li-Cs-рудной минерализацией. Некоторые из них рассматриваются в качестве собственных месторождений цезия, где он является одним из основных полезных компонентов. В качестве попутного источника цезия в пегматитовых рудах лития и тантала выступает лепидолит; также освоено получение цезия из сподумена и циннвальдита. Кроме того, высокие концентрации цезия в пересчете на его оксид установлены в астрофиллите (0,51-2,5 %), биотите (0,52-1,8 %), жильбертите (0,18-0,21 %), рибеките (до 0,29 %) и др.

По промышленному значению и минеральному составу, определяющему технологию переработки сырья и качество получаемых концентратов, руды, содержащие цезий, подразделяют на собственно цезиевые и комплексные цезий-рубидиевые.

К первому минеральному типу относят руды комплексных редкометалльных пегматитов, в которых цезий концентрируется преимущественно в поллуците, содержащем от 20 до 36 % оксида цезия, а остальная его часть рассеяна в слюдах (в основном в лепидолите и мусковите), в которых содержание оксида достигает 1,5 % и редко более. Кроме цезия в этом типе руд в промышленных концентрациях установлены также тантал и ниобий, бериллий, литий, рубидий.

К комплексному цезий-рубидиевому типу относят руды редкометалльных слюдисто-флюоритовых, слюдяных оловоносных и других грейзенов, а также слюдяные концентраты, попутно получаемые при флотационном обогащении бериллиевых, танталовых и поллуцитовых руд редкометалльных пегматитов. Для них характерны более низкие (до 1,5 %) содержания оксида цезия и высокие концентрации рубидия (до 4,5 %) и до 3,5 % оксида лития. В невысоких концентрациях (40-60 г/т) цезий наряду с рубидием и галлием содержится также в нефелиновых концентратах, получаемых при переработке апатит-нефелиновых руд.

Подтвержденные *мировые запасы цезия* оценивались Геологической службой США на начало 2013 г. в 172 тыс. т Cs_2O , но в 2014 г. они по ряду причин сократились до 90 тыс. т.

За рубежом добыча цезиевого сырья осуществляется в основном в Канаде на руднике Берник-Лейк, где объем добычи поллуцита в разные годы колебался от нуля до 500 т/год [6, 13], при этом извлекалось до 120 т оксида цезия.

Сведения о масштабах потребления цезия за рубежом крайне скудны. Объемы потребления ограничены не только высокой стоимостью металла, но также его высокой химической активностью, из-за чего металл расфасовывается и хранится в ампулах. Мировой спрос оценивается в 40-90 т, из них 30-40 т приходится на традиционные области применения и 20-50 т – на новые.

В России по состоянию на 01.01.2019 учтены запасы оксида цезия в качестве попутного компонента в рудах 16 месторождений. На редкометалльные пегматиты приходится 93,9 % суммарных запасов, 4,0 % – на флюоритовые метасоматиты в Приморском крае и чуть более 2 % учтено в рудах апатит-нефелиновых месторождений Хибин [1]. Производство товарного цезиевого сырья в стране отсутствует. При отработке апатит-нефелиновых месторождений попутно добываемый цезий полностью теряется в отходах производства. В 1990-1991 гг. металл и соединения цезия выпускались на ряде предприятий в Мурманской области и Красноярского края; потребление этой продукции оценивалось примерно в 16 т/год [13]. В 2013 г., по данным Metal Research, оно составило 3,1 т. В настоящее время информация о потреблении цезия в отечественной промышленности не публикуется.

Имеется информация, что на Новосибирском заводе редких металлов (НЗРМ) из импортных поллуцитовых концентратов, содержащих 25 % оксида цезия, выпускаются нитраты, сульфаты, карбонаты, хлориды цезия (всего 70 наименований). Производственные мощности НЗРМ по выпуску цезиевой продукции – 40 т в год.

Цезий и его соединения востребованы в радиотехнике, оптике, электротехнике. В химической промышленности он используется в качестве катализатора и промотора в реакциях органической и неорганической химии, при производстве медицинской аппаратуры и лекарств, в создании прецизионных стандартов частоты и времени. Цезиевый атомно-лучевой генератор принят в качестве абсолютного калибровочного стандарта, по которому настраивают кварцевые генераторы. На цезиевых атомных часах, имеющих точность несколько сотен миллиардов секунды, основаны интернет, сотовые телефоны, спутники систем связи и военные системы, измерение различных быстротекущих процессов, например, скорости химических реакций, передвижения космических тел и др. Цезиевый стандарт времени незаменим для работы систем спутниковой навигации (ГЛОНАСС, GPS, NAVSTAR и др.). Цезиевый формиат (соль муравьиной кислоты) является важным компонентом бурового раствора высокой плотности, используемого за рубежом для цементации глубоких высокотемпературных скважин на углеводороды.

Резюмируя изложенное выше, можно сделать следующее заключение.

1. Россия в количественном отношении обеспечена запасами рассеянных элементов (с учетом уровня не только внутреннего, но и мирового потребления) на многие десятилетия. Однако качество разведанных запасов ряда рассеянных элементов не соответствует требованиям перерабатывающей промышленности. На балансовый учет поставлены руды, содержащие попутные рассеянные элементы либо в неизвлекаемой форме, либо в очень

малых количествах, что исключает возможность их рентабельного извлечения. В результате эти элементы безальтернативно теряются при получении основной товарной продукции и списываются с балансов. Вместе с тем техногенные отходы, образующиеся при обогащении и переделе природных руд, заключают значительные количества таких рассеянных элементов, как ванадий, скандий, рубидий, цезий и др.

2. Добываются из недр в качестве попутных компонентов все рассмотренные рассеянные элементы, однако уровень их добычи определяется потребностями в титульном сырье извлекаемых из недр поликомпонентных руд. Полноценное использование комплексных руд, в том числе содержащих рассеянные элементы, сдерживается отсутствием либо спроса, либо разработанной и апробированной рентабельной технологии.

3. Сырьем для получения товарной продукции, содержащей рассеянные элементы, служат не природные руды и не получаемые из них концентраты, а продукты передела концентратов титульных полезных компонентов – шлаки, шламы, пыли, кеки, золы, растворы и т.д. В редких случаях товарной импортно-экспортной продукцией являются шлаки (ванадий), золы (германий) и даже цинковые концентраты, из которых импортеры наряду с основными компонентами извлекают рассеянные элементы.

4. В настоящее время востребованность и производство товарной продукции рассеянных элементов в России весьма неоднородны. Несмотря на значительное количество учтенных запасов, из добытой руды не получают рений, таллий, цезий, рубидий, гафний. В очень небольшом количестве, не покрывающем потребности отечественной промышленности, из собственного сырья извлекают скандий, галлий, германий. Также ограниченно получают индий, но при этом основное его количество идет на экспорт. Наиболее благополучно обстоит дело с ванадием, кадмием, селеном и теллуром. Страна обладает их крупными запасами, налажено производство, масштабы которого позволяют удовлетворять внутренние отечественные потребности и обеспечить выполнение экспортных обязательств.

5. В мире значительная роль в получении рассеянных элементов принадлежит вторичному сырью, из которого в начале 2000-х гг. извлекалось до 20 % кадмия, 35 % германия, порядка 50-60 % галлия и индия, существенное количество рения. По всей вероятности, значение вторичного сырья как источника получения рассеянных элементов может возрасти, а их спектр – расширяться.

Л и т е р а т у р а

1. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 28. Рассеянные элементы / Сост. Н.В. Привенцева. – М., 2019. – 46 с.
2. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 4. Ванадий / Сост. Т.О. Косенкова. – М., 2019. – 52 с.
3. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 27. Кадмий / Сост. И.А. Жукова. – М., 2019. – 156 с.

4. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации. Вып. 98. Примеси в месторождениях нефти. – М., 2019. – 54 с.

5. Особенности учета запасов редких элементов / Е.Н. Левченко, Л.З. Быховский, И.Г. Спиридонов, Д.С. Ключарев // Разведка и охрана недр. – 2019. – № 1. – С. 45-51.

6. U.S. Geological Survey, 2019. Mineral commodity summaries 2019: U.S. Geological Survey, – 200 p. URL: <https://doi.org/10.3133/70202434> (дата обращения: 05.02.2020).

7. Быховский Л.З., Спорыхина Л.В., Ануфриева С.И. Техногенные месторождения и образования редких металлов России // Рациональное освоение недр. – 2014. – № 3. – С. 14-22.

8. Редкоземельное и скандиевое сырье России. "Минеральное сырье". Вып. 31 / Л.З. Быховский, С.Д. Потанин, Е.И. Котельников [и др.]. – М.: РИС ВИМС, 2016. – 216 с.

9. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Supply and Demand of Lithium and Gallium. – 2016.

10. Roskill. Market Report. Gallium. Outlook to 2029.

11. Редкие металлы на мировом рынке. Книга 2. Металлы попутного производства. – М.: ИМГРЭ, 2008. – 162 с.

12. Alkane Resources Ltd. Zr chemicals: supply chain risks and opportunities. – 2018.

13. Редкие металлы на мировом рынке. Книга 1. Металлы, имеющие собственные месторождения. – М.: ИМГРЭ, 2008. – 195 с.

14. World Bureau of Metal Statistics. World Metal Statistics Yearbook. – 2019. – P. 20.

15. Roskill. Market Report. Rhenium. Outlook to 2029, 11th Edition. – 2019.

16. Гинзбург А.И. Рассеянные элементы руды // БСЭ: 3-е изд., т. 21. – 1975. – С. 483-485.

© Спорыхина Л.В., Быховский Л.З., Чернова А.Д., 2/2020
Спорыхина Лидия Викторовна, sporykhina@vims-geo.ru
Быховский Лев Залманович, lev@vims-geo.ru
Чернова Александра Дмитриевна, chernova@vims-geo.ru

The state and usage of Russian mineral resource base of scattered elements

L.V. Sporykhina, L.Z. Bykhovsky, A.D. Chernova (All-Russian Scientific-Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow)

In this article the definition of the term "scattered elements" is clarified, which is used in Russian classifications to determine group of rare elements except rare earths elements. Russian positions in the world resource base, production and usage of vanadium, gallium, germanium, hafnium, indium, cadmium, rhenium, rubidium, selenium, scandium, thallium, tellurium, cesium, are shown. The level of their extraction from ores, production volumes and areas of their usage is also represented. Now only 8 of marked elements are extracted from ores into commercial products, the others are lost in ore processing. But there are technological capabilities to processing all of trace elements in case of increasing consumption under good market conditions.

Key words: scattered elements; world mineral resource base; mineral reserves; production; consumption.