

УДК 553.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-3-18

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ФОТОВОЛЬТАИКИ

Александр Лукич Дергачев¹, Елизавета Михайловна Шемякина²,
Виктор Васильевич Дьяконов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alderg51@yandex.ru

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия; shemyakina_em@pfur.ru

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия; mdf.rudn@mail.ru

Аннотация. За последние годы в связи с дискуссиями об изменении климата и более чистых энергетических технологиях появились несколько сценариев электрогенерации в будущем. Все они предусматривают важную роль технологий фотovoltaики. Однако эти технологии являются более материалоемкими, чем традиционные методы электрогенерации. Беспокойство вызывает наличие достаточного количества редких элементов: In, Te, Se, Cd, Ge, Ga, которые критически необходимы для широкомасштабного внедрения новых технологий. Эти элементы извлекаются, в основном, попутно из руд меди, цинка и бокситов. В настоящей работе исследуются возможные естественные ограничения на их использование, вызванные влиянием растущего спроса на попутно извлекаемые редкие элементы на рынок главных металлов.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, технологии фотovoltaики, критическое минеральное сырье, попутные металлы, главные металлы

Для цитирования: Дергачев А.Л., Шемякина Е.М., Дьяконов В.В. Естественные ограничения на использование редких элементов в технологиях фотovoltaики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 3–18.

NATURAL CONSTRAINTS ON USE OF RARE ELEMENTS IN PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES

Aleksander L. Dergachev¹, Elizaveta M. Shemyakina², Viktor V. Dyakonov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alderg51@yandex.ru

² RUDN University, Moscow, Russia; shemyakina_em@pfur.ru

³ Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia; mdf.rudn@mail.ru

Abstract. In response to the ongoing debate on climate change and cleaner power technologies several scenarios for the future electricity generation have been recently proposed. All of them include a substantial share of photovoltaic solar technologies. However these technologies are more material intensive than traditional methods of power generation. There is a growing concern about availability of critical metals including In, Te, Se, Cd, Ge, Ga required for the large scale implementation of new technologies. These elements are companion metals recovered mainly from copper and zinc ores and bauxite. In this paper possible natural constraints on use of rare elements resulted from impact of increasing demand for companion metals on the supply of host metals are examined.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic technologies, critical mineral materials, companion metals, host metals

For citation: Dergachev A.L., Shemyakina E.M., Dyakonov V.V. Natural constraints on use of rare elements in photovoltaic technologies. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 3–18. (In Russ.).

Введение. Все известные сценарии реализации Парижского соглашения по климату предусматривают переход к низкоуглеродной электроэнергетике, ускоренное внедрение систем ветровой и солнечной электрогенерации, накопления и хранения электроэнергии, а также рост численности гибридных и электромобилей.

Низкоуглеродные технологии, в том числе и солнечная электрогенерация, являются более материалоемкими по сравнению с традиционными, и их повсеместное распространение неизбежно повлечет перестройку сырьевых потоков, создаст дополнительную

нагрузку на мировые запасы минерального сырья, мощности по его добыче и производству высокочистых минеральных материалов.

Конечно, дополнительное потребление минерального сырья в технологиях «зеленой энергетики» в значительной степени будет обусловлено возрастающим применением широко распространенных конструкционных материалов, таких как цемент и некоторые металлы. Так, чугун и сталь, алюминий, а также марганец, хром, медь, свинец, цинк и другие, уже сейчас производятся в мире в больших количествах. Хотя связанное с энергетическим переходом

дополнительное потребление некоторых из перечисленных металлов будет измеряться десятками и сотнями миллионов тонн, доля низкоуглеродных технологий в их глобальном потреблении будет оставаться сравнительно низкой. Поэтому дополнительный спрос, возникающий в новой области применения, может относительно просто удовлетворяться за счет перераспределения потребления между традиционными областями использования этих металлов.

Однако небольшая часть дополнительного потребления минеральных материалов приходится на редкие элементы, которые, хотя и имели в последние десятилетия разнообразные области применения, до 2020 г. производились в крайне незначительных объемах. Найдется не много таких примеров, когда реализация планов развития мировой электроэнергетики, а значит, и мировой экономики в целом, в исторически кратчайшие сроки оказывалась бы в столь сильной зависимости от непрерывности поставок нескольких металлов, глобальное производство которых измерялось бы десятками или несколькими сотнями тонн в год. Целый ряд из них благодаря уникальным свойствам этих элементов или их соединений критически важны для технологий энергетического перехода и не имеют равнозначных заменителей, но пользуются весьма ограниченным распространением в природе и с трудом поддаются повторному использованию после утилизации отслуживших положенный срок изделий. Не смотря на это долговременные сценарии развития энергетики, которые представлены Международным энергетическим агентством (МЭА) и различными исследовательскими группами, практически не рассматривают последствия значительного роста спроса на минеральные материалы, сопряженные с переходом к низкоуглеродной энергетике. Между тем при проявлении в будущем факторов, ограничивающих предложение этих материалов, успех реализации энергетических сценариев может оказаться под вопросом, и это немедленно окажет негативный эффект на развитие всех секторов экономики.

В публикациях последнего времени, в том числе в более ранних работах авторов, было продемонстрировано критически важное значение некоторых из этих металлов для новых энергетических технологий и были проанализированы разнообразные риски, связанные с неравномерным распределением их запасов между странами и крайне высокой концентрацией их рудничного и (или) металлургического производства [Дергачев, Шемякина, 2023].

В целом ряде работ рассматривались риски, связанные с обеспечением будущей «зеленой» энергетики достаточным количеством таких остро необходимых для нее минеральных материалов, как Co, Ni, Al, Cu, Mo, Li, РЗЭ, Ag, Ga, Ge, In, Cd, Se, Te и других элементов ([Buchert et al., 2009; US DOE, 2011; Graedel et al., 2012; Goe, Gaustad, 2014; Grasdell, Thorenz, 2014] и др.). В более ранних работах

авторов с использованием компьютерной модели было показано, в частности, что суммарный дополнительный спрос на Dy, Co, In, Cd, Ge, Te, Se, Ga в технологиях энергетического перехода, определенный для сценария МЭА 2DS, в 2021–2050 гг. составит существенную часть, а для некоторых критических элементов (In, Te, Ge) многократно превзойдет их мировые запасы, которые могли бы быть извлечены в металлургическую продукцию при современных технологиях [Дергачев, Шемякина, 2024].

Наличие достаточной минерально-сырьевой базы критических металлов и минералов является только одним из условий успешного перехода к низкоуглеродной энергетике. Другой важный аспект составляют требования к горно-металлургическому комплексу, в задачу которого входит непосредственно обеспечивать добычу, обогащение и переработку необходимых полезных ископаемых в требуемом количестве. Поэтому важно оценить возможность при нынешнем уровне развития горных и металлургических технологий обеспечить необходимый масштаб добычи критических металлов без разбалансирования рынка, падения цен на важнейшие минеральные материалы, сокращения их промышленных запасов и иных негативных последствий.

Целью настоящей публикации является прежде всего выяснить, в какой степени существующий горно-металлургический комплекс способен обеспечить добычу критически важных для фотовольтаики элементов в количестве, достаточном для реализации сценария МЭА 2DS в части развития технологий солнечной электрогенерации, а также оценить возможное влияние роста потребления этих элементов на рыночное предложение других минеральных материалов.

Методика исследований. Типы солнечных панелей и минеральные материалы для них. Согласно сценарию МЭА 2DS, доля солнечных электростанций в глобальной установленной мощности электрогенерации к 2050 г. составит примерно 32%, т. е. возрастет в 4,4 раза по сравнению с 2020 г. [IEA, 2016, 2017; World Bank, 2020]. Хотя существуют разнообразные способы превращения солнечной энергии в электрическую, среди них решающую роль в удовлетворении растущей потребности человечества в электроэнергии, по-видимому, будут играть технологии фотовольтаики. При этом считается, что тяжелые, громоздкие солнечные панели на основе кристаллического кремния (c-Si), эффективность которых значительно снижается со временем в течение срока эксплуатации (примерно 30 лет), будут вытесняться уже имеющимися на рынке тонкопленочными солнечными панелями. Они являются более легкими и гибкими, удобными в эксплуатации, дешевыми и достаточно эффективными. В них используются современные полупроводниковые материалы, такие как теллурид кадмия (CdTe), диселенид меди-индия-галлия (CIGS), аморфный кремний

с изовалентной примесью германия (a-SiGe). Во всех этих субтехнологиях фотовольтаики в значительных количествах используются сталь, Al, Cu, Sn, а также Pb (солнечные панели типа c-Si), Zn и Mo (CIGS). Если в традиционных панелях типа c-Si в качестве проводника применяется Ag, то для производства тонкопленочных панелей наряду с широко распространенной медью используются редкие элементы: In, Ga, Se, Cd, Te и Ge.

В базовом варианте расчетов на основе разработанной авторами компьютерной модели предусмотрен опережающий рост в 2021–2050 гг. наиболее перспективных, тонкопленочных субтехнологий фотовольтаики [Дергачев, Шемякина, 2024] с темпом 14,2 % в год по сравнению с 3,5 % в год для традиционных солнечных панелей на основе кристаллического кремния. Благодаря этому доля панелей типа c-Si в суммарной установленной мощности солнечных электростанций снизится с 95 % в 2020 г. до 50 % в 2050 г., а остальная часть, как предполагается, будет распределяться между хорошо зарекомендовавшими себя тремя типами тонкопленочных солнечных панелей, причем доля каждого типа в 2050 г. составит около 631 ГВт, или 16,7 % установленной мощности электростанций на солнечных панелях по сравнению с 1,7 % в 2020 г.

Прогнозируемое потребление металлов. Фактическим материалом для дальнейшего анализа является прогнозируемый с использованием компьютерной модели спрос на цветные и редкие металлы в различных областях в период с 2021 по 2050 г.

Прогноз потребления цветных и редких металлов в каждой из субтехнологий фотовольтаики основывался на возрастании его пропорционально росту установленной мощности генерации солнечных панелей, в которых используются эти элементы. Потребление каждого из металлов в некоторый год и в той или иной из четырех субтехнологий солнечной электрогенерации рассчитывалось как произведение годового прироста установленной мощности (ГВт) солнечных электростанций, где используется эта субтехнология, и удельного потребления этого металла в соответствующих солнечных панелях (тонны на 1 ГВт установленной мощности) [Дергачев, Шемякина, 2024]. Кумулятивный спрос на этот металл в определенной субтехнологии за весь 30-летний период реализации сценария МЭА 2DS получался путем суммирования значений годового спроса в период с 2021 по 2050 г.

Потребление цветного или редкого металла в фотовольтаике в целом в некоторый год рассчитывалось путем суммирования данных о спросе на этот металл в каждой из четырех субтехнологий в этот год. Результаты прогнозирования потребления важнейших цветных (Cu, Al, Zn, Pb, Sn) и редких элементов (In, Cd, Ge, Ga, Se, Te, Ag) в 2050 г. и суммарное потребление их за 30-летний период в каждой из субтехнологий солнечной электрогенерации приведены в табл. 1 и 2. Там же содержатся сведения о

спросе на металлы в целом при реализации сценария МЭА 2DS (то есть во всех технологиях солнечной и ветровой электрогенерации, системах накопления и хранения электроэнергии и электрическом транспорте), а также в традиционных областях применения этих элементов.

Прогноз потребления тех же металлов в традиционных областях основывался на предположении, что средние темпы его роста до 2050 г. (%) в год) останутся такими же, как 2000–2012 гг., то есть до начала массового строительства солнечных электростанций.

Глобальное потребление каждого из металлов в экономике в целом рассчитывалось для каждого года путем суммирования его потребления в технологиях энергетического перехода (в том числе в солнечных панелях всех типов) и во всех остальных (традиционных) отраслях экономики.

Источники и получение редких элементов. Элементы, играющие исключительно важную роль в наиболее перспективных технологиях фотовольтаики (Se, Te, Ga, Ge, Cd, In), по характеру распространения относятся к типичным рассеянным, а по содержанию в земной коре — к типичным редким элементам.

Эти элементы очень редко встречаются в природе. Как следует из диаграммы на рис. 1, Te наряду с Re пользуется наименьшим распространением среди 47 важнейших элементов, для которых имеются надежные сведения о масштабах их добычи и использования в экономике в 2020 г. (по данным [Mineral..., 2024]). Шесть элементов, критически важных для технологий фотовольтаики, вместе с благородными металлами (Au, Ag, Pt, Pd), а также Tl, Hg, Bi, Ta и Re образуют группу элементов, наименее распространенных в земной коре и добываемых (в том числе и по этой причине) в наименьших количествах.

В природе практически не встречаются месторождения, в которых содержания Se, Te, Ga, Ge, Cd, In были бы настолько высоки, чтобы их можно было считать главными полезными компонентами руд. Иными словами, эти элементы не образуют собственных месторождений. В частности, при нынешних ценах разработка месторождений с Te или Se как главными компонентами руд не рентабельна. В этом смысле китайское месторождение Дашийгоу, руды которого содержат от 0,01 до 34,58 % Te, на данный момент является единственным открытым в мире собственно теллуровым месторождением [Yin, et al., 2024]. Как правило же, перечисленные элементы рассеяны в медных, свинцово-цинковых, оловянно-вольфрамовых рудах, а также в бокситах. В их составе они добываются из недр вместе с главными компонентами этих руд и извлекаются из них попутно преимущественно при металлургической переработке концентратов руд, главными полезными компонентами которых являются, в основном, Cu, Zn, а также при переработке руд Al (преимущественно бокситов) в глинозем (рис. 2).

Таблица 1

Потребление важнейших первичных цветных металлов в различных областях в 2050 г. и суммарное в 2021–2050 гг.

Области применения	Потребление металлов, млн т									
	Cu		Al		Zn		Sn		Pb	
	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего
Технологии энергетического перехода, в том числе технологии фотовольтаики	2,0 1,5	23,5 14,1	2,8 2,3	31,1 23,1	1,0 0,002	15,0 0,019	0,026 0,026	0,29 0,29	0,005 0,005	0,088 0,088
Традиционные области применения: потребление темпы роста потребления в 2021–2050*	34,6	819,8	325,7	4994,2	20,3	488,3	0,4	10,3	8,2	185,2
		1,7 %		5,5 %		1,6 %		1,6 %		2,1 %
Глобальное потребление (во всех отраслях)	36,6	843,3	328,5	5025,3	21,3	503,3	0,5	10,6	8,2	185,3

Примечание. * — проценты в год.

Таблица 2

Потребление редких металлов в субтехнологиях солнечной электрогенерации и в традиционных областях применения в 2050 г. и суммарное в 2021–2050 гг.

Типы солнечных панелей и средние темпы роста установленной мощности (% в год)	Установленная мощность генерации, ГВт		Потребление металлов, тыс. т															
	2020		2050		Ag		Ge		Cd		Te		In		Ga		Se	
	ГВт	%	ГВт	%	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего
Технологии фотовольтаики																		
c-Si (3,5 %)	674	95	1890	50	1,3	24,3												
a-SiGe (14,2 %)	11,8	1,7	631	16,7			2,3	17,8					0,4	3,2				
CIGS (14,2 %)	11,8	1,7	631	16,7					0,1	0,5	0,4	2,9	2,2	17,3	0,7	5,6	3,2	25,4
CdTe (14,2 %)	11,8	1,7	631	16,7					5,5	43,4	4,7	37,2	0,6	5,0				
Всего	709,4	100	3784	100	1,3	24,3	2,3	17,8	5,6	43,9	5,1	40,1	3,2	25,6	0,7	5,6	3,2	25,4
Традиционные области применения и средние темпы роста потребления (% в год)																		
	53,1	1152,3 (2,3 %)	0,4	6,8 (5,1 %)	32,6	863,3 (0,9 %)	2,3	35,3 (5,7 %)	4,4	68,7 (5,2 %)	1,0	17,5 (3,6 %)	7,8	159,8 (2,9 %)				
Глобальное потребление																		
	54,4	1176,6	2,7	24,6	38,2	907,2	7,4	75,4	7,6	94,3	1,7	23,1	11,0	185,2				

Попутные редкие элементы в рудах алюминия. Из руд алюминия, главным образом, из бокситов в настоящее время извлекается почти весь первичный Ga, близкий к Al по химическим свойствам. Поскольку стоимость галлия, заключенного в них, намного меньше, чем стоимость главного металла (алюминия), количество извлекаемого попутно Ga, в конечном счете, ограничивается количеством произведенного Al.

Бокситы содержат в среднем 0,005 % Ga (50 г/т), и даже самые богатые из них, добываемые в Суринаме, содержат лишь 0,008 % галлия. При переработке их в технический глинозем по способу Байера (автоклавное выщелачивание алюминия и кремнезема из бокситов горячими растворами NaOH под давлением) большая часть (70–80 %) Ga

в виде галлата натрия переходит в аллюминиатные растворы, которые служат основным источником получения Ga, а остальная часть накапливается в шламе («красной глине»). При пропускании через растворы CO₂ из них выделяют сначала Al(OH)₃, а затем в смеси с ним в последней фракции осадка осаждается гидроксид галлия. Смесь далее растворяют в растворе гидроксида Na и электролизом получают технический галлий. Для получения Ga высокой чистоты (99,9999 % — 99,99999 %), пригодного для производства полупроводниковых соединений, используют кислотно-щелочную обработку, вакуумную плавку, электролитическое рафинирование, а с целью глубокой очистки — зонную плавку. Весь процесс является очень энергоемким и трудоемким, поэтому используется только в странах, где благо-

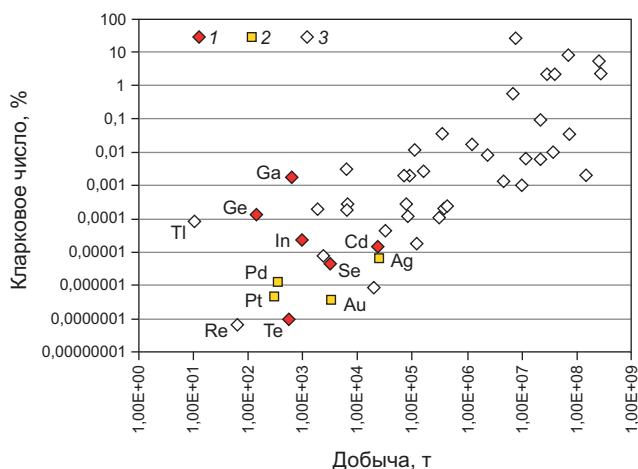


Рис. 1. Содержание элементов в земной коре по [Haynes et al., 2016] и масштабы их добычи по [Mineral..., 2024]: 1 — редкие рассеянные элементы, используемые в современных тонкопленочных солнечных панелях, 2 — благородные металлы, 3 — прочие элементы

даря дешевизне природных и трудовых ресурсов затраты на производство оказываются относительно низкими.

В настоящее время первичный Ga в очень небольших количествах получается еще из возгонов, образующихся в цинковом производстве при переработке хвостов выщелачивания цинковых огарков (попутно с Ge). Потенциально этот металл можно извлекать из угольной золы уноса (содержит от 0,01 до 0,1 % Ga), из «красной глины» или из пыли, выдуваемой из электрических печей при производстве фосфора. Однако в дальнейших расчетах мы будем исходить из предположения о получении 100 % Ga попутно при переработке бокситов в глинозем.

Попутные редкие элементы в цинковых рудах. Цинковые руды являются главными источниками In, Ge и Cd, которые не образуют собственных месторождений. Минералы этих элементов встречаются редко, и обычно они в качестве примесей входят в состав сульфидов, сульфосолей, оксидов цветных металлов на месторождениях разных типов.

Кадмий образует немногочисленные и весьма редко встречающиеся собственные минералы, но основная масса металла рассеяна в сульфидах Zn, Pb, Cu, Fe, Hg в рудах среднетемпературных свинцово-цинковых и медноколчеданных месторождений. Максимальные содержания Cd (мас.%) отмечаются в сфалерите (от 0,4–0,6 до 5), более низкие — в халькопирите (0,006–0,12); в виде примеси кадмий присутствует в станинне (0,003–0,2) и галените (0,005–0,02).

Небольшое количество этого металла извлекается из пыли свинцовых и медеплавильных заводов, но основная часть Cd попутно получается при переработке флотационных цинковых концентратов, содержащих обычно 0,3–0,5 % Cd. Извлечение металла из руд в концентрат составляет 90–98 %. Концентрат далее подвергается окислительному обжигу, затем огарок выщелачивается серной кислотой. Из раство-

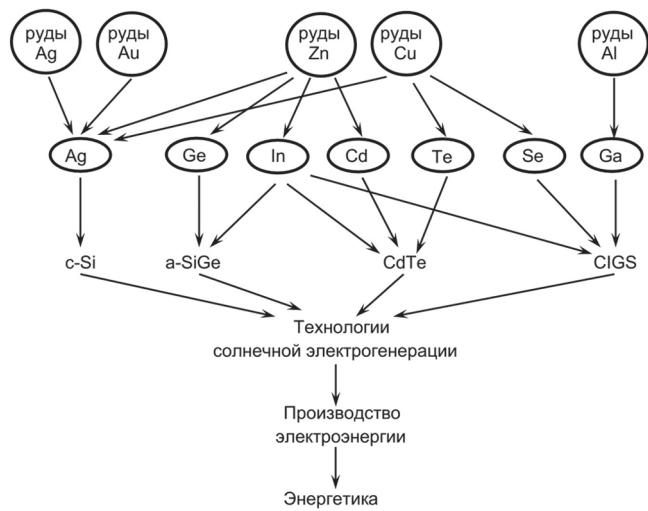


Рис. 2. Источники редких металлов для солнечных панелей различных типов

ра добавлением цинковой пыли осаждают сначала Cu, а затем Cd. Из очищенного раствора сульфата цинка электролизом получают металлический цинк. В дальнейшем Cd очищают от примесей цветных металлов и растворяют в серной кислоте. Товарный металлический Cd чистотой около 99,95 % выделяют путем электролиза раствора.

Индий концентрируется в сфалерите и в меньшей степени халькопирите, в которых содержание металла достигает (мас.%) 0,1–1 и 0,05–0,1 соответственно. В виде небольшой примеси он также входит в состав станинна, сульфосолей Sn, теннантита и касситерита. Главными промышленными источниками являются свинцово-цинковые, оловянно-вольфрамовые и медные руды, содержащие от 0,001 % до 0,1 % In. Большая часть металла (70–75 %) сосредоточена в особенно богатых In рудах относительно более высокотемпературных колчеданных месторождений типа VMSD и рудах более низкотемпературных свинцово-цинковых месторождений в терригенных (тип SEDEX) или карбонатных породах (тип долины Миссисипи). Небольшая часть металла (суммарно 10–15 %) встречается также в рудах жильно-штокверковых Sn-W, жильных полиметаллических (иногда с Sn), медно-порфировых (иногда с Zn и Pb), полиметаллических эпимеральных жильно-штокверковых месторождений.

Из пыли медеплавильных и оловянных заводов при переработке соответствующих рудных концентратов попутно извлекаются лишь 5 % мирового производства In. Основная часть металла получается из промежуточных продуктов и отходов цинкового и свинцового производства. Дымовая пыль и шлаки, образующиеся при обжиге цинковых или свинцово-цинковых концентратов и при их пирометаллургической переработке, а также электролитические шламы, которые образуются в результате мокрого процесса производства цинка, обрабатывают серной или соляной кислотой, переводя In в раствор. Из него гидролитическим осаждением выделяют концентрат. Элементарный индий получают электро-

литически из раствора хлорида In(III) в соляной кислоте. В настоящее время извлечение In из руд достигает 80 %. Товарный In обычно имеет чистоту 99,97 %. Применяя метод зонной плавки или повторный электролиз расплавов хлоридных солей In(I), можно получить металл с чистотой 99,99999 %, необходимый для производства полупроводников.

Германий, кроме собственных минералов (в основном, сульфосолей), входит в сульфиды Zn и Cu (сфалерит и вюрцит могут содержать до 0,3 мас.% Ge, а энаргит, тенантит, борнит и халькопирит — до 0,5 мас.% Ge). Этот элемент попутно извлекается, в основном, из Pb-Zn сульфидных руд низкотемпературных месторождений типов SEDEX и долины Миссисипи, а также из руд Cu-Zn-Pb-Ag-Ge месторождений типа Кипуши [Paradis, 2015].

Составленная авторами компьютерная модель для расчетов дополнительного потребления металлов в технологиях энергетического перехода предусматривает получение из рудных месторождений только 70 % необходимого Ge, как это имеет место в настоящее время [Дергачев, Шемякина, 2024]. Считается, что и в будущем около 30 % необходимого металла будут получаться за счет переработки золошлаковых отходов угольных электростанций, но в дальнейшем анализе они не учитываются и обсуждаются возможности обеспечения только 70 % спроса на Ge в технологиях «зеленой» энергетики (в основном, в фотовольтаике), которые будут попутно получаться за счет извлечения этого элемента из руд металлов.

Производство Ge из руд включает стадии получения германиевого концентрата (обычно оксида или сульфида Ge) и стадию хлорирования и последующей очистки. Если металл получается из цинковых концентратов, которые предназначены для пирометаллургической переработки, их сначала подвергают обжигу и спеканию. Отделяющиеся при этом пыль и газы собирают и обрабатывают серной кислотой. С помощью сероводорода или дубильной кислоты из раствора осаждается GeS₂. При получении цинка электролитическим способом перед электролизом растворы сульфата цинка подвергаются очистке путем осаждения из них Ge, Fe и других примесей.

Полученный сульфид Ge подвергают окислению с помощью окислителя (например, хлорида натрия) для конвертации сульфида в GeO₂. Диоксид германия растворяют в концентрированной HCl с образованием GeCl₄, который затем очищается методом фракционной дистилляции и подвергается гидролизу деионизированной водой. После сушки GeO₂ восстанавливается водородом при температуре 760 °C с получением германиевого порошка. Его расплавляют и изготавливают слитки, из которых после зонной плавки получается металл с чистотой 99,99999 %.

При пирометаллургическом способе получения Zn концентрат сначала подвергается окислительно-му обжигу, и практически весь Ge остается в огарке.

При последующем агломерирующем обжиге некоторая часть Ge (2–5 %) удаляется вместе с газами и концентрируется в улавливаемой пыли, из которой может извлекаться. Большая часть Ge, содержащегося в агломерате, в процессе дистилляции накапливается в ретортных остатках, где его концентрация достигает от нескольких сотых до нескольких десятых долей процента.

При гидрометаллургическом (основном в настоящее время) способе производства цинка подавляющая часть германия остается в отвальных кеках выщелачивания цинковых огарков. При их переработке по методу возгонки 30–40 % Ge концентрируется в возгонах благодаря летучести монооксида GeO. Таким образом, при цинковом производстве источниками германия могут быть пыли агломерационного обжига, ретортные остатки, кеки выщелачивания цинковых огарков и оксиды возгонов при их переработке.

Практически 100 % Cd, 95 % In и 70 % Ge (т. е. весь Ge, извлекаемый из руд металлов) получаются попутно из отходов и промежуточных продуктов металлургического производства Zn [Bleiwas, 2010]. В дальнейшем анализе последствий производства редких металлов в количествах, достаточных для удовлетворения потребностей технологий фотовольтаики и реализации сценария МЭА 2DS, для упрощения принимается, что 100 % необходимых для этого Cd и In, а также весь Ge, извлекаемый из руд металлов, будут получаться попутно из промежуточных продуктов и отходов цинкового производства.

Содержания In, Cd, Ge на месторождениях цветных металлов всегда слишком низкие, чтобы они могли рассматриваться как главные промышленные компоненты руд. Сведения о содержаниях этих элементов в рудах месторождений Zn отрывочны. В дальнейшем вслед за [Fthenakis, 2004; Elshkaki, Graedel, 2015] предполагается, что руды цинка в типичном случае могут содержать 4 % Zn, 0,02 % Cd, 0,002 % Ge и 0,0004 % In. Это означает, что при условии 100-процентного извлечения критических металлов из руды соотношения производства попутных и главного компонента должны составить 5000 г Cd, 500 г Ge и 100 г In на 1 т Zn.

Попутные редкие элементы в медных рудах. Среди всех металлов, используемых в технологиях солнечной электрогенерации, медь по объему потребления, безусловно, уступает стали и чугуну, но среди цветных металлов — лишь алюминию. Благодаря использованию ее в том числе и в солнечных панелях всех типов глобальный спрос на этот металл возрастет с 20,7 млн т в 2020 г. до 36,6 млн т в 2050 г. Из этого количества только 2 млн т будет использовано в технологиях энергетического перехода, в том числе около 1,5 млн т — в разнотипных солнечных панелях. Таким образом, в 2050 г. в технологиях фотовольтаики найдут применение лишь 4,1 % производимой меди. Однако значение этого металла

не ограничивается только его непосредственным участием в солнечных панелях. Сульфидные руды Cu (и в намного меньшей степени руды Pb) являются главными промышленными источниками Se и Te.

Эти элементы образуют микроскопические включения собственных минералов (селенидов и теллуридов) и как химические аналоги серы изоморфно замещают ее в структуре десятков минералов во всех месторождениях сульфидных руд цветных металлов. В настоящее время Se и Te извлекаются, в основном, из пирита, халькопирита, сфалерита, галенита, пирротина, висмутина, арсенопирита, кассiterита и других минералов. При этом важнейшую роль играют огромные по запасам низкокачественных руд Cu- и Au-Cu-порфировые месторождения, а также вулканогенные колчеданные месторождения цветных металлов (тип VMSD).

Глобальные средние содержания металлов в медных рудах в настоящее время составляют (%) 0,0002 Te, 0,0005 Se и 0,8 Cu [Fthenakis, Anctil, 2013]. Это означает, что в руде, содержащей 1 т Cu, заключено в среднем также 250 г Te и 625 г Se.

Однако существующие технологии переработки медных руд не позволяют извлекать из них весь Se и Te. Основная часть этих редких элементов (на разных предприятиях от 20 до 80 % в зависимости от минерального состава руд) теряется еще на стадии обогащения, при отделении флотационного медного концентрата от пиритных хвостов. При окислительном обжиге медного концентрата, плавке на штейн и конвертации штейна с получением черновой (анодной) меди значительная часть этих элементов теряется в пылях и в возгонах в виде Se, Te и их оксидов. При обжиге медного концентрата в печи кипящего слоя в газовую фазу переходит 45–60 % Se, содержащегося в концентрате. Наибольшее улетучивание обоих элементов (84 % Se и 95 % Te) наблюдается при обжиге пиритного концентрата в многоподовой печи. Технологии переработки пыли и возгонов очень сложны и многостадийны, поэтому экономическая целесообразность их реализации обуславливается комплексностью извлечения редких металлов. В медной промышленности пыли, как правило, возвращают в цикл пирометаллургии (агломерацию, плавку), но при плавке пылей значительная часть Se и Te теряется с газами; таким образом, оборот пыли не увеличивает их извлечение.

В итоге на классических медных месторождениях типа VMSD на Урале при переработке медных концентратов в черновую медь, поступающую на электролитическую очистку, извлекается не более 30–40 % содержащихся в концентратах Se и Te [Лебедь и др., 2015].

Согласно [Nassar et al., 2022], в 1986–2018 гг. годовые средние взвешенные содержания Te в анодной меди составляли (%мас.) от 0,0076 до 0,0143 (от 0 до 0,07 на разных предприятиях). В процессе электролитической очистки меди Se и Te почти полностью переходят в анодные шламы, в которых средние взве-

шенные содержания в тот же период колебались (%) от 1,4 до 2,3 Te (от 0 до 11 на разных предприятиях) и 5–25 Se в виде селенидов и теллуридов благородных металлов [Nassar et al., 2022]. Именно извлечение Au, Ag и МПГ является главным приоритетом при комплексной переработке шламов, но в то же время такая переработка — единственный рентабельный метод получения Se и Te. Из медных шламов попутно получается 90 % мирового производства этих элементов, и лишь небольшая часть их извлекается из отходов производства Pb, Zn и Au [Ојебиобох, 2008].

Медные шламы обычно обрабатываются растворами серной кислоты для доизвлечения Cu (при этом выщелачиваются и около 2 % Te). Для получения Se применяют окислительный обжиг с возгонкой SeO_2 ; нагревание шлама с концентрированной серной кислотой, окисление соединений селена до SeO_2 с его последующей возгонкой и восстановлением до элементарного Se с помощью SO_2 ; окислительное спекание с содой, конверсию полученной смеси соединений селена до соединений Se(IV) и их восстановление до элементарного селена действием SO_2 [Butterman, Brown, 2004]. Получаемый Se в дальнейшем рафинируют перекристаллизацией, перегонкой в вакууме, гидридным или иными методами для получения высокочистого (99,999 % Se) и особо чистого селена (от 99,999 до 99,9999 % Se), используемого, в частности, для получения полупроводниковых материалов.

После отделения от шламов Cu и Se остаток, содержащий Pb, Sb, благородные металлы и Te, переплавляют для получения золото-серебряного сплава. При этом Te переходит в содово-теллуровые шлаки, содержащие 20–35 % Te. Их дробят, размалывают и выщелачивают водой. Из раствора теллур осаждают электролизом на катоде. Получающийся теллуровый концентрат обрабатывают щелочью в присутствии алюминиевого порошка, переводя Te в раствор в виде теллуридов. При этом примеси тяжелых металлов концентрируются в нерастворимом осадке, а раствор отделяется и продувается воздухом для осаждения элементарного Te чистотой 99 %. Теллур повышенной чистоты получают повторением теллуридной переработки, а для производства наиболее чистого продукта сочетают методы химической очистки, вакуумной дистилляции и зонной плавки, которые позволяют получать товарную продукцию чистотой от 99,99999 до 99,999999 %. Существующие в настоящее время технологии дают возможность на некоторых предприятиях извлекать из медных шламов до 90 % Te. Вместе с тем, анализ систематических данных по предприятиям отрасли в мире показывал, что из медных анодных шламов извлекается лишь четверть содержащегося в них Te [Nassar et al., 2022].

Особенности попутного производства металлов. Элементы, критически важные для технологий фотовольтаики, получаются преимущественно попутно из руд цветных металлов. Содержания этих элементов в рудах очень низкие, а объемы их вы-

пуска обычно весьма невелики. Поэтому даже при высоких ценах на Te, Ge и другие элементы их вклад в стоимость товарной продукции, выпускаемой металлургическими предприятиями, как правило, очень мал по сравнению с извлекаемыми из тех же руд главными полезными компонентами. Действительно, в 2020 г. в мире было произведено 12,1 млн т первичного цинка на 29,5 млрд долл. и попутно получено 140 т Ge, на 147 млн долл., что составило около 0,5 % стоимости главной товарной продукции. Экономическое процветание отдельных предприятий и отрасли в целом в этом случае зависит, в основном, от объема производства требующейся рынку главной товарной продукции, т. е. в конечном счете от спроса на Zn, существующего в данный момент на рынке. Производство попутных компонентов будет продолжаться и возрастать до тех пор, пока не возникнет угроза дестабилизации рынка главной продукции (например, угроза перепроизводства главного металла).

Статус Cd, Ge, Ga, In, Te и Se как попутных полезных компонентов означает, что добыча этих элементов не зависит от спроса или изменения цены на них. Для адекватной оценки риска поставок добываемых попутно редких элементов важно, что предложение их на рынке определяется спросом на главные металлы сульфидных руд и бокситов, из промежуточных продуктов и отходов переработки которых они извлекаются. Чем выше спрос на очищенные Zn и Cu, тем больше руд цинка и меди, а значит и металлов в их составе (не только главных, но и рассеянных редких элементов) будет добыто из недр, и тем выше окажется рыночное предложение редких элементов, попутно извлекаемых из отходов металлургических производств.

В случае с медью действует еще более жесткое ограничение. Все большая часть этого металла извлекается из руд путем выщелачивания. Соответствующая технология появилась в 1960-х гг., а в 2020 г. благодаря ей были получены 4,19 млн т первичной меди (почти 20 % мировой добычи). Эта технология исключает извлечение Te и Se. Редкие элементы извлекались исключительно попутно с остальной частью мирового производства меди (21,10 млн т Cu), которая была получена с использованием пирометаллургических методов и последующей электролитической очистки металла. Таким образом, предложение Se и Te на мировом рынке зависит не от производства меди вообще, а от количества этого металла, получаемого методами пирометаллургии.

Для цветных металлов глобальное предложение их на мировом рынке принято характеризовать масштабами мировых запасов и ресурсов. Применительно к попутно получаемым Te, Se, Ga, Ge, Cd, In эти понятия утрачивают свое значение. Поскольку нельзя относить к категории запасов то, что не может быть добыто независимо от спроса на главный металл, предложение попутных компо-

нентов лучше характеризовать количеством металла, которое потенциально может быть произведено в год.

Содержания редких элементов в рудах цветных металлов очень низкие, извлечение и очистка их от примесей представляют собой очень сложный многоступенчатый процесс, на каждой стадии которого неизбежны потери ценных компонентов. В результате при нынешнем уровне развития технологий не удается достигать приемлемо высокого извлечения, по крайней мере, некоторых попутных компонентов. Практически все критически важные для фотовольтаики элементы характеризуются низкими средними по отрасли коэффициентами извлечения. Другой возможной причиной этого является то, что не все отходы металлургического производства Cu, Zn и Al подвергаются соответствующей переработке по причине отсутствия необходимых технологий и низкой инвестиционной привлекательности таких производств.

Создание соответствующих производственных мощностей и извлечение металла потребовало бы значительных затрат. В какой степени они будут оправданы дополнительными доходами от реализации попутных продуктов, в конечном счете решается руководством металлургических предприятий. Не исключено, что инвестирование в создание мощностей для получения попутных компонентов из руд или в модернизацию производства с целью повышения коэффициента извлечения их из отходов производства основного металла будет признано не целесообразным, особенно если это может каким-то образом повлиять на выпуск главной товарной продукции. В результате инвестиционно привлекательными такие производства оказываются только в странах с относительно низкими затратами, прежде всего в Китае, и это является важнейшей причиной концентрации металлургического производства критически важных для фотовольтаики элементов.

Для целей данного исследования полезен расчет соотношения между реальным металлургическим производством главных и попутных компонентов руд. Оно может быть получено как частное от деления годового глобального производства попутного металла на объем производства главного компонента тех же руд. Это отношение зависит, в частности, от содержания металлов в рудах, наличия технологий производства попутных металлов и мощности соответствующих производств, эффективности извлечения попутных элементов из отходов производства главных металлов и цен на металлы.

Результаты и их обсуждение. Спрос на металлы в технологиях фотовольтаики и пути его удовлетворения. Ранее было показано, что при реализации сценария МЭА 2DS в базовом варианте расчетов из 24 важнейших типов металлов и индустриальных минералов (сталь и чугун, Mn, Cr, 20 цветных и редких металлов и графит) в наи-

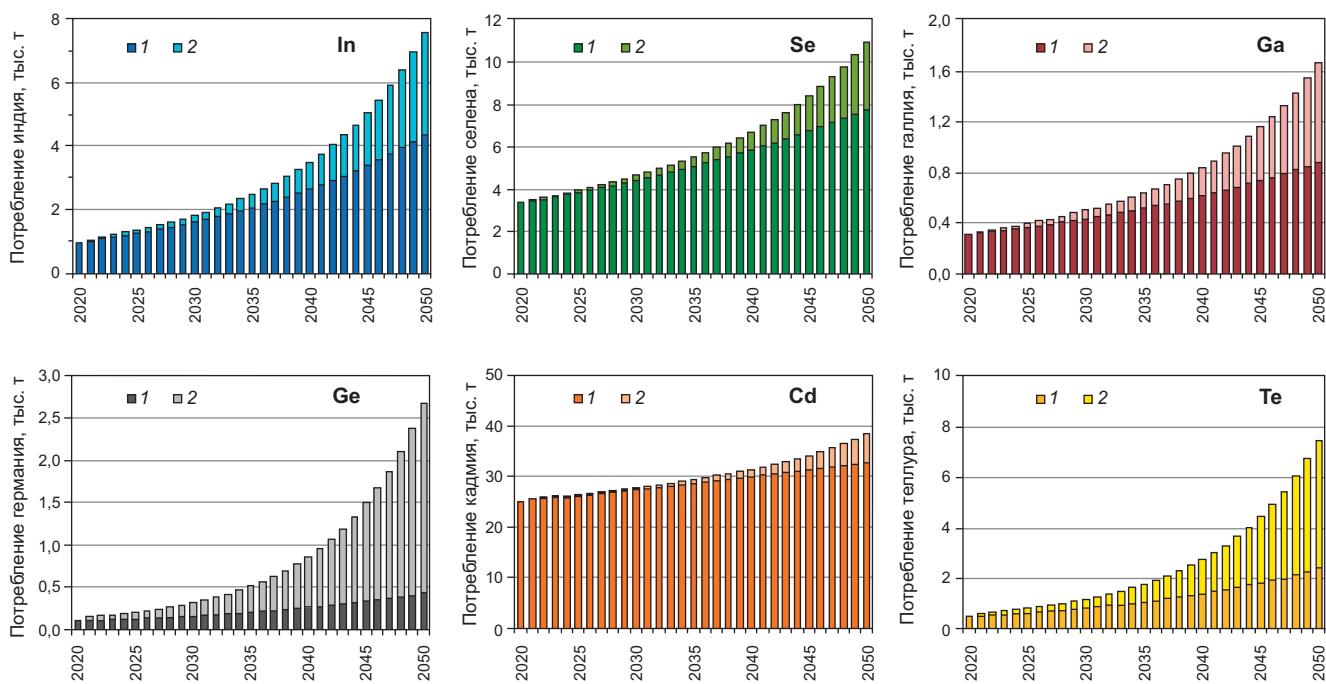


Рис. 3. Потребление индия, селена, галлия, германия, кадмия, теллура в 2021–2050 гг.: 1 — в традиционных областях, 2 — в солнечных панелях типов CIGS (In, Ga, Se), a-SiGe (Ge) и CdTe (Cd, Te)

больших масштабах в 2021–2050 гг. наряду со сталью и графитом будут использоваться (суммарное потребление за 30 лет, млн т) алюминий (31,1), медь (23,5) и цинк (15,0) [Дергачев, Шемякина, 2024]. При этом среди технологий энергетического перехода электростанции с солнечными панелями разных типов станут главными потребителями цветных металлов, где в 2021–2050 гг., по расчетам, найдут применение (млн т) 23,1 Al, 14,1 Cu, в то время как потребление Zn не превысит 0,019. По прогнозу, на солнечные панели разных типов будет приходиться 100 % дополнительного потребления Pb и Sn, связанного с энергетическим переходом, 69 % Al, 55 % Cu, и только 0,1 % Zn. Однако значение этих металлов для реализации сценария МЭА 2DS не ограничится их непосредственным участием в составе солнечных панелей. Они являются в настоящее время, и видимо, останутся в обозримом будущем главными полезными компонентами руд, из которых попутно извлекаются редкие элементы, получающие все более широкое применение в традиционных областях, но главное, приобретающие критически важное значение для технологий энергетического перехода, прежде всего фотовольтаики.

Эти технологии к 2050 г. могут превратиться в крупнейший рынок для Te, Se, Cd, In, Ge, Ga, на который будет приходиться (доля глобального потребления, %) 85 Ge, 69 Te, 46 Ga, 42 In, 29 Se, 15 Cd (рис. 3). Эти шесть редких элементов используются в различных технологиях «зеленой» энергетики. Так, Ga, In, Ge в небольших количествах применяются в гибридных и электромобилях. Но важнейшей областью их применения будут солнечные панели разных типов. В них будет использован весь Cd, Te и Se, практически 100 % Ge и In, 85 % Ga, а также 80 %

Ag, которые найдут применение в новых энергетических технологиях.

Ожидается, что дополнительный спрос на редкие металлы, возникающий из-за использования редких элементов в солнечных панелях, в 2050 г. во много раз превзойдет их потребление всей мировой экономикой в 2020 г. (кроме Se и Cd). Дополнительный спрос на Te, например, составит 5,1 тыс. т против глобального спроса 0,44 в 2020 г., на In — 3,2 против 0,9, на Ge — 2,3 против 0,1, на Ga — 0,8 против 0,3 и лишь на Se — 3,2 против 3,3 и на Cd — 5,6 против 25.

От возможности удовлетворить потребности фотовольтаики в этих элементах будет решительным образом зависеть успех в реализации сценария МЭА 2DS и вообще выполнение Парижского соглашения по климату. Удовлетворению растущих потребностей технологий фотовольтаики в редких элементах, не образующих собственных месторождений, могли бы способствовать, например, повышение коэффициента использования вторичных металлов, вовлечение в разработку новых типов месторождений, повышение коэффициента извлечения редких элементов из руд других металлов, и (или) увеличение рудничного (добыча из недр) и металлургического производства главных металлов.

Однако, как было показано ранее [Дергачев, Шемякина, 2024], при сроке эксплуатации солнечных панелей 30 лет, лома, содержащего редкие элементы, в солнечной электроэнергетике в период 2021–2050 гг. практически не образуется. В настоящее время промышленных технологий для их извлечения из отслуживших солнечных панелей не существует, а их перспективы в будущем не ясны. Из-за очень низких содержаний элементов в ломе и присутствия в нем многочисленных других металлов этот ис-

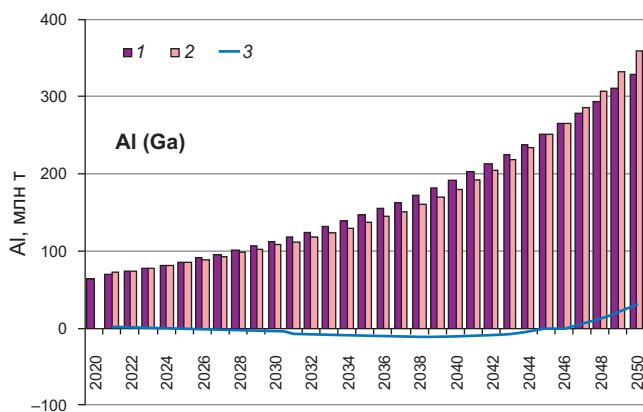


Рис. 4. Глобальный спрос (1), производство (2) и перепроизводство (3) алюминия, рассчитанные на основе глобального потребления попутно извлекаемого галлия

точник позволит удовлетворять лишь малую часть потребностей в них в технологиях фотовольтаики и других областях.

В перспективе большое значение в качестве источников Тe, например, могут приобрести обогащенные им эпимеральные золото-теллуридные месторождения, из руд которых этот элемент в настоящее время не получается. Однако месторождения этого типа обладают малыми запасами руд и кардинально повлиять на удовлетворение будущего рыночного спроса на Тe они не могут.

Обычным способом удовлетворения растущего спроса на какой-то металл является увеличение его производства из руд. Ответом на растущий спрос на Cu, например, является разведка новых медных месторождений, начало добычи руд меди на новых и повышение коэффициента использования производственных мощностей на существующих горных и металлургических предприятиях, строительство новых металлургических заводов по выплавке и очистке металла. В принципе растущий спрос в технологиях фотовольтаики и в других отраслях на попутно добываемые редкие элементы может быть удовлетворен за счет роста добычи главных металлов, из руд которых они извлекаются. Однако в этом случае важно знать, как это скажется на рынке самих главных металлов и не окажется ли неприемлемо высокой цена, которую придется заплатить мировой экономике за удовлетворение спроса на Se, Te, Cd, Ge, In, Ga в «зеленой» энергетике.

Спрос на Ga и предложение алюминия. В 2020 г. было добыто 379 млн т бокситов из их разведанных запасов 32000 млн т. Из добытого сырья 96 % было использовано для получения 136 млн т глинозема и затем 65352 тыс. т Al [World Mining Data, 2024]. Попутно из растворов глиноземного производства извлечено 304 т Ga из содержащихся в исходных бокситах 18950 т этого металла. Таким образом, 1 т галлия получалась попутно при производстве 215 тыс. т Al, а среднее по отрасли извлечение Ga с учетом его содержание в бокситах (см. раздел 2.3.3) составляло 1,6 %.

В 2050 г. спрос на Ga только в технологиях фотовольтаики по расчетам должен составить 706 т (табл. 2). При существующих в настоящее время условиях такое количество первичного металла могло бы быть получено попутно при производстве 151,8 млн т Al. Глобальное же потребление Ga составит 1670 т, и такое количество металла при нынешних технологиях могло бы быть получено попутно при производстве 359,1 млн т первичного алюминия.

В то же время, согласно базовому варианту расчетов [Дергачев, Шемякина, 2024], глобальное потребление (а значит, и мировое производство) первичного Al в 2050 г. составит 328,5 млн т, в том числе 2,8 млн т в технологиях энергетического перехода и 325,7 млн т в традиционных областях (в них прогнозируемый рост спроса на металл в 2021–2050 гг. составит 5,5 % в год). Как видим, при сохранении нынешних технологий полное удовлетворение глобального спроса на Ga в 2050 г. возможно только при производстве 30,6 млн т первичного Al сверх мирового спроса на этот металл. При этом значительных масштабов перепроизводство металла приобретет лишь начиная с 2046 г. (рис. 4).

Вместе с тем в 2021–2050 гг. кумулятивное потребление Ga во всех отраслях мировой экономики, согласно базовому варианту расчетов, составит 23,1 тыс. т (табл. 2). Такое количество металла может быть получено при производстве 4966,5 млн т первичного алюминия при прогнозируемом кумулятивном спросе на него в тот же период 5024,9 млн т.

Таким образом, даже при нынешних технологиях и невысоком коэффициенте извлечения Ga из бокситов удовлетворение дополнительного спроса на него в альтернативной энергетике (главным образом, в солнечных панелях типа CIGS) в целом за 30-летний период, вероятно, не приведет к критическому перепроизводству алюминия, разбалансированию мирового рынка этого металла и резким колебаниям цен на него.

Спрос на Cd, Ge, In и предложение цинка. В 2020 г. в мире было получено из концентратов 12 100 тыс. т Zn. Попутно из отходов и промежуточных продуктов металлургического производства Zn было произведено 22800 т Cd, 140 т Ge и 941 т In [Mineral..., 2024]. Таким образом, реальное глобальное соотношение между произведенным Zn и редкими металлами, извлеченными из отходов его производства, составило 1884 г Cd, 11,6 г Ge и 77,8 г In на 1 т Zn. Иными словами, при нынешних отношениях Cd:Zn, In:Zn и Ge:Zn попутно получить 1 т Cd можно при производстве 530,8 т Zn, 1 т In и 1 т Ge — при получении 12853 и 86207 т Zn соответственно. Сравнение соотношений редких металлов с Zn в составе руд, рассмотренных ранее, и в продукции цветной металлургии показывает, что при металлургической переработке руд и концентратов в среднем по отрасли извлекались (%) 38 Cd, 2,3 Ge и 78 In, содержащихся в руде.

Используя глобальные соотношения между реальным металлургическим производством главного и попутных металлов цинковых руд в 2021 г., можно рассчитать, каким должно быть предложение (производство) цинка в 2021–2050 гг., чтобы планы по развитию солнечной электрогенерации в рамках реализации сценария МЭА 2DS были выполнены при сохранении заданного соотношения между тремя типами тонкопленочных панелей в установленной мощности солнечных электростанций.

Потребление первичных металлов только в технологиях фотovoltaики в 2050 г. должно составить 5561 т Cd, 3244 т In и 2254 т Ge (табл. 2). Глобальный спрос на эти металлы составит 38200 т, 7601 т и 2681 т соответственно, и при существующих условиях (нынешних технологиях получения металлов) необходимое количество Cd потребует производства 20,3 млн т Zn, In — 97,7 млн т, а Ge — 231,1 млн т первичного Zn (рис. 5).

Удовлетворение спроса на Cd не повлечет перепроизводства Zn, потребность в котором, по прогнозу, в 2050 г. составит 21,3 млн т (рис. 5, а). Но минимальное количество Zn, которое необходимо произвести для полного удовлетворения потребностей «зеленой энергетики» во всех трех редких металлах только в 2050 г. составило бы 231,1 млн т, что по ряду признаков не реально. Действительно, уже в самом начале рассматриваемого периода проявилась бы проблема перепроизводства цинка, и только в 2050 г. избыток предложения Zn составил бы 209,8 млн т (рис. 5, б). Это означает, что наращивать спрос на Ge, и значит, установленную мощность солнечных электростанций с панелями типа a-SiGe предлагаемыми темпами (14,2 % в год) можно либо ценой перепроизводства цинка, что невозможно в условиях рынка, либо снизив темпы роста до 1,8 % в год (средний темп роста глобального спроса на Zn).

В 2021–2050 гг. глобальное потребление Ge составило бы 24,6 тыс. т, что возможно при производстве 2120,7 млн т Zn, тогда как глобальный спрос на этот металл за весь период, по расчетам, не превысит 503,3 млн т. Таким образом, за 30 лет перепроизводство главного металла цинковых руд должно было бы составить не менее 1617,4 млн т.

При производстве 2120,7 млн т главного металла в 2021–2050 гг. попутно были бы получены также 165,0 тыс. т In и 3994 тыс. т Cd при глобальном потреблении их в 30-летний период 94,3 тыс. т и 907 тыс. т соответственно. Это означает, что при сохранении нынешних условий (современных технологий, коэффициента извлечения металла из руд, цен и т. д.) удовлетворение потребности фотovoltaики в Ge на 70 % за счет извлечения его из цинковых руд приводит к перепроизводству не только Zn, но и попутно извлекаемых In и Cd. Особого внимания заслуживает необходимость захоронения нескольких млн т Cd дополнительно к тому количеству этого чрезвычайно экологически опасного металла,

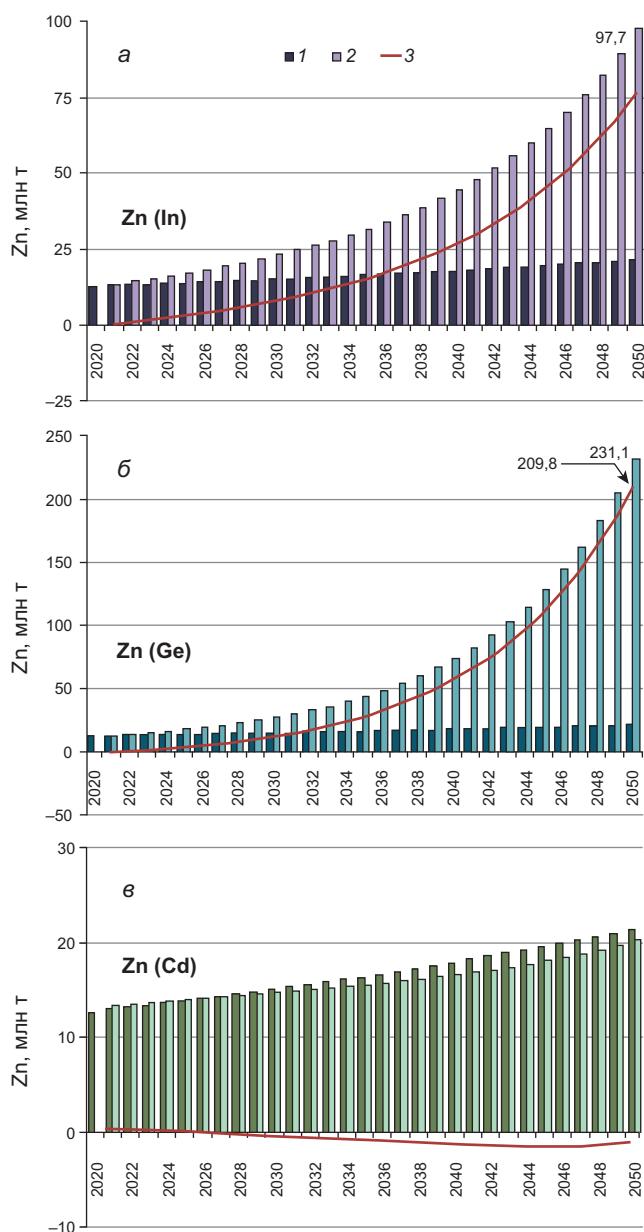


Рис. 5. Глобальный спрос (1), производство (2) и перепроизводство (3) цинка, рассчитанные на основе глобального потребления попутно извлекаемых редких элементов: Индия (а), Германия (б), кадмия (в)

которое при нынешних технологиях не извлекается из руды.

Увеличение мирового производства очищенного Zn с 13 млн т в 2020 г. до 231,1 млн т за 30 лет (средние темпы роста 10,1 % в год) потребовало бы быстрого наращивания металлургических мощностей по производству этого металла, что окажется абсолютно не реальным на фоне колоссального переизбытка металла на рынке.

Таким образом, можно ожидать, что при сохранении нынешних технологий в 2021–2050 гг. производство Zn, рассчитанное на удовлетворение потребностей в попутно получаемых In и Ge, будет значительно превышать глобальные потребности в главном металле цинковых руд. Это могло бы при-

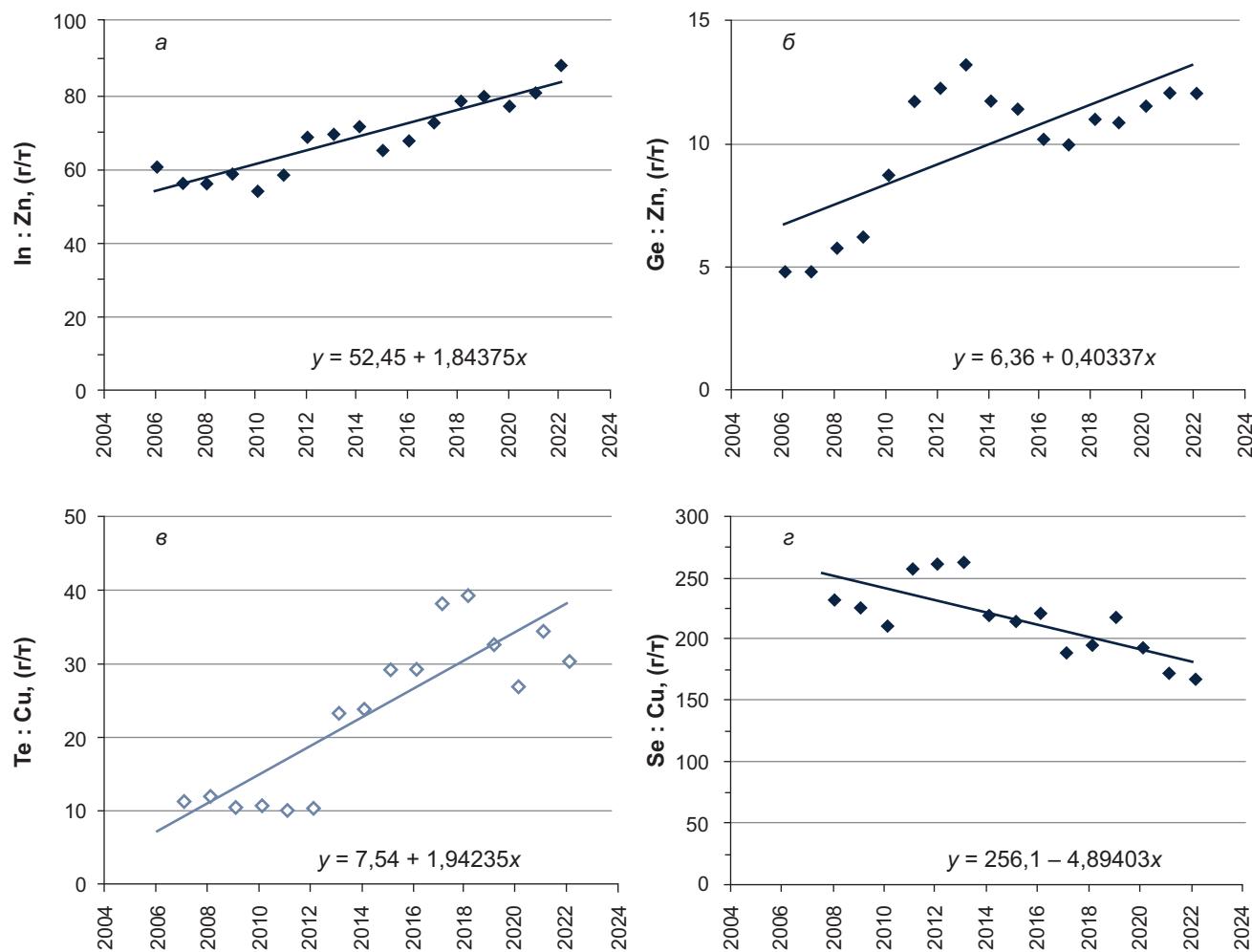


Рис. 6. Изменение отношений главных металлов (Cu, Zn) и попутно извлекаемых редких элементов (Se, Te, In, Ge) в реальном мировом металлургическом производстве в 2007–2022 гг. (грамммы редких металлов на 1 т меди или цинка): *а* — In:Zn, *б* — Ge:Zn, *в* — Te:Cu, *г* — Se:Cu

вести к разбалансировке огромного рынка цинка. При возникновении избытка предложения этого металла, и возможно, попутно извлекаемых Cd и In, на рынке неизбежно произошло бы падение цен на них с последующим сокращением масштабов производства. Другими следствиями могли бы стать сокращение мировых запасов Zn и частичный или полный отказ от использования вторичных редких металлов.

Из других способов увеличения предложения редких металлов, исключающих одновременный рост производства (предложения) цинка, хорошие перспективы имеет повышение коэффициентов извлечения попутных редких металлов из цинковых руд, т. е. повышение отношений In:Zn и Ge:Zn в производстве очищенных металлов, которые в предшествовавшие годы постоянно возрастили. Изменение отношения In:Zn в 2005–2022 гг. описывается уравнением линейной регрессии $y = 52,45 + 1,84375x$ (рис. 6, *а*). Из него следует, что уже в 2031 г. прогнозируемое отношение In:Zn в реальном металлургическом производстве In сравняется со средним отношением металлов в рудах (100 г In на 1 т Zn), и значит, извлечение In из руд достигнет 100 %. Од-

нако более реалистичным кажется предположение, что отношение In:Zn будет возрастать, но достигнув 90 г на 1 т Zn в 2026 г., в дальнейшем стабилизируется на этом уровне (извлечение из руд, содержащих в среднем 100 г/т In, составит 90 %). Однако и в этом случае в 2050 г. для удовлетворения глобального спроса на этот металл (7601 т) потребовалось бы произвести 84 млн т Zn, что по-прежнему в несколько раз превышало бы прогнозируемый глобальный спрос на Zn в 2050 г. (21,3 млн т).

Прогнозируемое отношение Ge:Zn в соответствии с уравнением линейной регрессии $y = 6,36 + 0,40337x$ (рис. 6, *б*) в 2050 г. составит 24,5 г на 1 т Zn. Это означает, что при средних содержаниях в руде 500 г/т Ge извлечение его из руды достигло бы почти 4,9 %. Однако и при наблюдавшемся в последние годы темпе роста извлечения Ge из руд удовлетворение глобального спроса на металл в 2050 г. (2681 т) могло бы быть достигнуто только при производстве 109,4 млн т Zn. Это все равно практически в 5,1 раза превысило прогнозируемый глобальный спрос на Zn в 2050 г., и значит, сделало бы неизбежным перепроизводство главного металла цинковых руд.

Как видим, проблема перепроизводства главного металла при удовлетворении потребностей фотовольтаики в редких элементах из цинковых руд может стать менее острой, но не может быть полностью решена при сохранении нынешних технологий и (или) при темпах их совершенствования, достигнутых в последние десятилетия.

Для реализации сценария МЭА 2DS требуются очень быстрые изменения в технологии получения Ge, снижение к 2050 г. потерь металла на различных стадиях его попутного извлечения для достижения отношения: 126 г Ge на 1 т Zn. Однако задача повысить извлечение Ge из руды минимум в 11 раз с нынешних 2,3 % почти до 25 % при среднем содержании в руде 500 г/т Ge очень трудно разрешима.

Проблему перепроизводства главного металла, кроме того, можно решить, изменив установившееся на сегодняшний день и заложенное в компьютерную модель соотношение между золошлаковыми отходами угольной энергетики и отходами цинкового производства как источниками Ge (30 : 70). Это, однако, потребовало бы еще более радикальных инноваций в технологиях, поскольку переработка отходов угольных электростанций (главным образом, золы уноса) в настоящий момент является рентабельной лишь в России и Китае.

Спрос на Te и Se и предложение меди. В 2020 г. в мире было произведено 16900 тыс. т катодной меди из руд и концентратов [Mineral..., 2024], а попутная добыча интересующих нас редких элементов составила 459 т Te и 3279 т Se [World Mining Data, 2024]. Таким образом, отношения главного и попутных полезных компонентов медных руд в их реальном металлургическом производстве составили 27,2 г Te и 194 г Se на 1 т первичной меди, произведенной пирометаллургическими методами. Иначе говоря, если предположить, что установившиеся в последние годы соотношения Te:Cu и Se:Cu сохранятся в предстоящий период, то 1 т Se можно будет попутно получать при производстве 5155 т, а 1 т Te — при получении 36819 т катодной меди. Сравнение этих цифр с приведенными выше содержаниями металлов в руде показывает, что имеющиеся на сегодняшний день технологии дают возможность рентабельно извлекать из руд 10,9 % Te и 31,0 % Se.

Согласно базовому варианту расчетов на основе электронной модели, в 2050 г. только в технологиях энергетического перехода потребление первичных металлов составит 5075 т Te и 3216 т Se [Дергачев, Шемякина, 2024]. Глобальный же спрос в тот же год достигнет 7424 т Te и 11007 т Se. В нынешних условиях, при существующих технологиях получения редких элементов такое количество Se может быть произведено только при получении методами пирометаллургии 56,7 млн т меди, а Te — при производстве 272,9 млн т Cu (рис. 7).

Однако в базовом варианте расчетов прогнозируемое глобальное потребление первичной меди в 2050 г. составит 36,6 млн т, в том числе 2,0 млн т

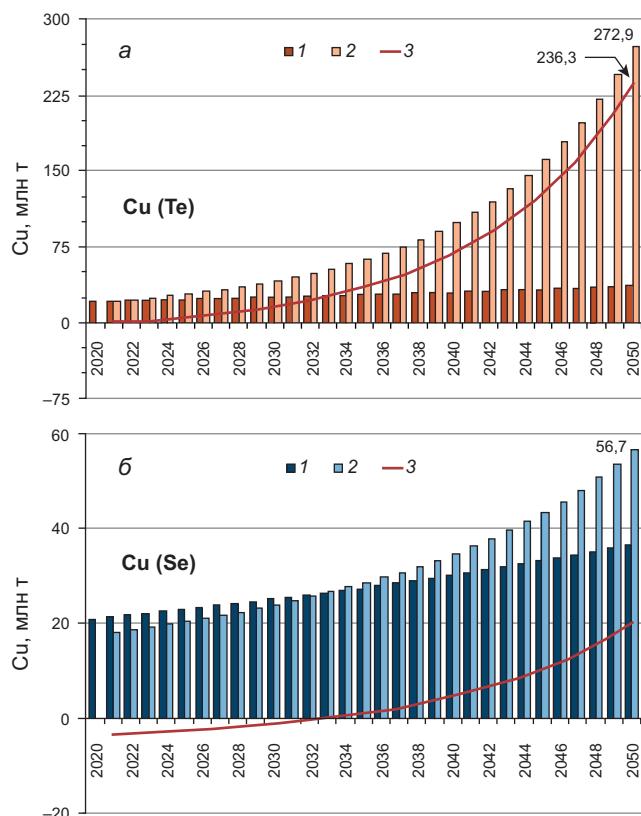


Рис. 7. Глобальный спрос (1), производство (2) и перепроизводство (3) меди, рассчитанные на основе прогнозируемого глобального потребления попутно извлекаемых теллура (а) и селена (б)

в «зеленой» энергетике и 34,6 млн т в традиционных областях (с учетом поддержания темпов роста потребления в них на уровне 1,7 % в год после 2020 г.). Очевидно, что для полного удовлетворения потребностей «зеленой энергетики» в обоих элементах в 2050 г. потребовалось бы произвести 272,9 млн т Cu, что абсолютно не реально — рыночное предложение меди в 2050 г. оказалось бы на 236,3 млн т больше глобального спроса на металл (рис. 7, а). Перепроизводство Cu проявилось бы уже в самом начале рассматриваемого периода и стало бы важнейшим ограничителем в использовании солнечных панелей типа CdTe. После этого установленная мощность солнечных электростанций с панелями этого типа могла бы возрастать не на 14,2 %, как предусмотрено сценарием, а только пропорционально росту глобального потребления Cu, т. е. на 1,9 % в год.

Всего же в 2021–2050 гг. кумулятивное потребление Te во всех отраслях, согласно базовому варианту расчетов, должно составить 75,4 тыс. т, что потребует получения только методами пирометаллургии 2772,1 млн т рафинированной меди при спросе на металл в тот же период около 843,3 млн т. Попутно было бы получено также 537,7 тыс. т Se при глобальном потреблении его за 30 лет лишь 185,2 тыс. т.

Предусмотренный достаточно консервативным сценарием энергетического перехода рост потребления Se, пропорциональный среднему темпу роста

установленной мощности генерации электростанций с солнечными панелями типа CIGS (14,2 % в год), привел бы к переизбытку предложения меди на рынке, начиная с 2033 г. (рис. 7, б). После этого, по-видимому, должно быть принято вынужденное решение о замедлении темпов роста установленной мощности электростанций с солнечными панелями, использующими Se, до 1,9 % в год (пропорционально росту производства меди).

Приведенные результаты исследования показывают, что при сохранении нынешних технологий или достигнутых на сегодняшний день темпов их развития (в частности, роста отношений Se : Cu и Te : Cu) удовлетворение потребностей фотовольтаики в попутно получаемых редких элементах, следующих из сценария МЭА 2DS, неизбежно привело бы к огромному переизбытку на рынке не только главного металла медных руд, но и попутного Se.

Считается, что даже небольшое повышение извлечения Te позволило бы увеличить отношение Te : Cu в производстве металлов цветной металлургией и получать существенно больше теллура для нужд фотовольтаики (в частности, [Ојевцовоh, 2008]. Между тем это отношение в 1980–2012 гг. демонстрировало негативный тренд и лишь после этого стало повышаться (рис. 6, в). Изменение этого отношения в 2007–2022 гг. описывается уравнением линейной регрессии $y = 7,54 + 1,94235x$. Из этого следует, что при сохранении этой тенденции в 2050 г. в цветной металлургии будет производиться 91 г Te на 1 т Cu. Коэффициент извлечения Te из руд меди превысил бы 36 %. Однако и в этом случае для удовлетворения глобального спроса на теллур (7424 т) потребовалось бы произвести с использованием пирометаллургических методов 81,6 млн т первичной меди при глобальном спросе на металл 36,6 млн т.

Отношение Se : Cu в последние годы снизилось с 234 в 2008 г. до 168 г Se на 1 т Cu в 2022 г. С учетом среднего содержания Se в медных рудах это означает снижение коэффициента извлечения металла в металлургическую продукцию с 37 до 27 %. В соответствии с уравнением линейной регрессии $y = 256,1 - 4,89403x$ в 2050 г. отношение Se : Cu снизилось бы до 40,7 г Se на 1 т Cu (при этом извлечение Se при производстве меди составило бы 6,5 %) (рис. 6, г). При таком соотношении производства меди и попутного Se для выполнения сценария МЭА 2DS в части строительства солнечных электростанций с панелями типа CIGS в 2050 г. потребовалось бы произвести 270,4 млн т Cu. Таким образом, производство меди только в 2050 г. составило бы 233,8 млн т.

Такой дисбаланс и любое ускорение распространения технологий фотовольтаики, использующих Te, неизбежно вызвал бы падение цен на Cu и Se, а также сокращение мировых запасов меди, многие месторождения которой (в частности, медно-порфировые) могли бы оказаться нерентабельными. Другими негативными последствиями стали бы

сокращение использования некоторых вторичных цветных и редких металлов и отказ от метода выщелачивания как альтернативы пирометаллургическим методам получения меди. Наконец, среди последствий возрастания производства меди отдельного рассмотрения требуют проблема возрастающего попутного производства не находящих применения экологически опасных Cd, As, и возможно Se, а также увеличение выбросов парниковых газов при многостадийном производстве цветных металлов.

Заключение. Проблемы будущей электроэнергетики не ограничиваются только наличием и достаточностью запасов минеральных материалов, потребности в которых возрастают по мере перехода к новым энергетическим технологиям. Другим важным аспектом проблемы является невозможность для горно-металлургического комплекса при нынешнем состоянии существующих в нем технологий обеспечить необходимый для солнечных электростанций масштаб попутной добычи редких элементов (особенно In, Te и Ge) из медных и цинковых руд без разбалансирования рынка, сокращения промышленных запасов и падения цен на главные металлы: медь и цинк.

Естественные ограничения на применение Cd, In, Ga, Ge, Te, Se в технологиях солнечной фотовольтаики накладываются свойствами этих жизненно важных для нее элементов. Они пользуются крайне ограниченным распространением в природе, их редкие собственные минералы практически не имеют промышленного значения, и чаще всего они изоморфно замещают цветные металлы или серу в минералах других элементов. В связи с этим они не образуют собственных месторождений, где они были бы главными полезными компонентами, производство которых определялось бы только спросом на сами эти элементы. Они содержатся в рудах других металлов в крайне малых количествах, и из-за этого практически ничего не добавляют к стоимости главной товарной продукции, даже не смотря на высокие цены на эти металлы. Они не отделяются от главных цветных металлов при обогащении и могут получаться только из отходов или полупродуктов их металлургического производства после извлечения главных металлов и в результате технически сложной и дорогостоящей многоступенчатой очистки. Их получение всегда сопряжено с большими потерями (низким извлечением элементов из руд в товарную продукцию) и может окупаться только при условии комплексного использования исходного минерального сырья и при низких затратах.

Никакие возможности обеспечения технологий фотовольтаики редкими элементами не реализуемы, если они приводят к существенному перепроизводству главных металлов руд, и значит дестабилизации рынков цинка и меди, нарушению баланса спроса и предложения этих металлов, падению цен на них и сокращению их мировых запасов. В этом отношении при нынешнем состоянии горно-ме-

титанометаллургического комплекса и существующих в нем технологий являются недостижимыми цели разработанного Международным энергетическим агентством сценария 2DS в варианте, предусматривающем ускоренный рост установленной мощности солнечных электростанций с получающими все большее распространение тонкопленочными солнечными панелями. Их внедрение потребует недопустимого увеличения производства Cu и Zn, значительно превышающего уровень их прогнозируемого глобального потребления в мировой экономике.

Острота проблемы может быть существенно снижена за счет использования вторичных металлов, извлекаемых из отслуживших солнечных панелей, расширенного использования альтернативных источников сырья, получение металлов из которых не связано с производством Cu и Zn (зола уноса угольных электростанций для Ge, руды золото-титанометаллургических месторождений для Te и т. д.).

Однако радикальное решение проблемы потребует глубокой модернизации существующих в горно-металлургическом комплексе технологий, разработки рентабельных методов более полного попутного извлечения Se, Te, Cd, Ga, Ge, In из отходов производства Cu и Zn и больших капитальных вложений.

Следует иметь в виду, что в истории развития цветной металлургии сквозное извлечение всех попутных компонентов медных и цинковых руд,

особенно Ge и Te, всегда было очень низким. Это означает, что использование накопившихся за многие десятилетия отходов металлургического производства позволило бы несколько уменьшить нагрузку на недра и снизить остроту проблемы перепроизводства главных металлов.

Анализ, использующий данные о мировом производстве, мировых ценах, глобальном спросе на элементы, критически важные для солнечной энергетики, не может отражать все разнообразие ситуаций в обеспечении этими минеральными материалами, которые будут возникать в экономике конкретных стран. Можно лишь с уверенностью констатировать, что успехов в развитии солнечной электрогенерации в перспективе смогут добиться прежде всего те страны, которые окажутся в состоянии поддержать распространение новых технологий фотовольтаики в собственной экономике производством редких металлов полупроводникового качества на своих металлургических предприятиях и из руд собственных месторождений. Такие страны очень малочисленны и список их очень сильно отличается от перечня стран, которые около полутора десятилетий назад восприняли концепцию ускоренного перехода на возобновляемые источники энергии, исходя из политических соображений и без серьезной инженерной оценки обеспеченности энергетического перехода минеральными материалами при нынешнем состоянии технологий в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Запасы критического минерального сырья и дополнительные потребности в нем в эпоху энергетического перехода // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 3–16.
- Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Критическое минеральное сырье для малоуглеродной энергетики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 3–10.
- Лебедев А.Б., Набойченко С.С., Шунин В.А. Производство селена и теллура на ОАО «Уралэлектромедь». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2015. 112 с.
- Bleiwasser D.I. Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells // U.S. Geological Survey Circular 1365. 2010. URL: <http://pubs.usgs.gov/circ/1365/>
- Buchert M., Schuler D., Bleher D. Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential // UNEP, 2009. URL: http://www.resourcefever.org/publications/reports/UNEP_OEKO_CriticalMetals_July09.pdf (дата обращения: 01.07.2024).
- Butterman W.C., Brown R.D.Jr. Mineral Commodity Profiles: Selenium // U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Open-File Report 03-018. 2004. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-018/of03-018.pdf> (дата обращения: 01.07.2024).
- Elshkaki A., Graedel T.E. Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply // Applied Energy. 2015. Vol. 158. P. 167–177.
- Fthenakis V. Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2004. Vol. 8 (4). P. 303–334.
- Fthenakis V., Anctil A. Direct Te mining: resource availability and impact on cumulative energy demand of CdTe PV life cycles // IEEE Journal of Photovoltaics. Vol. 3. 2013. № 1. P. 433–438.
- Goe M., Gaustad G. Identifying critical materials for photovoltaics in the US: a multi-metric approach // Appl. Energy. 2014. Vol. 123. P. 387–396.
- Graedel T.E., Barr B., Chandler C., et al. Methodology of metal criticality determination. Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 46. P. 1063–1070.
- Grandell L., Thorenz A. Silver supply risk analysis for the solar sector // Renew Energy. 2014. Vol. 69. P. 157–165.
- Haynes W.M., Lide D.R., Bruno T.J. CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data // Boca Raton, Florida: CRC Press. 2016. P. 14–17.
- IEA (International Energy Agency) 2016. Energy technology perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems // Paris: IEA. 2016. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2016> (дата обращения: 17.03.2022).
- IEA 2017. Energy technology perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations // Paris: IEA. 2017. URL: <https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives> (дата обращения: 10.01.2022).
- Mineral Commodities Summaries 2024. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information> (дата обращения: 02.08.2024).
- Nassar N.T., Kim H., Frenzel M., et al. Global tellurium supply potential from electrolytic copper refining // Resources, Conservation & Recycling. 2022. Vol. 184. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922002774?via%3Dihub> (дата обращения: 01.07.2024).

Ojebuoboh F. Selenium and tellurium from copper refinery slimes and their changing applications // World of Metallurgy — ERZMETALL. V. 61. 2008. P. 33–39.

Paradis S. Indium, germanium and gallium in volcanic- and sediment-hosted base-metal sulphide deposits // Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings, November 13–14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Geological Survey Paper 2015-3. P. 23–29.

US DOE (U.S. Department of Energy) 2011. Critical materials strategy // DOE.2011. URL: http://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf (дата обращения: 01.01.2023).

World Bank 2020. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition. Washington, DC: World Bank. 2020. URL: <https://www.commdev.org/publications/minerals-for-climate-action-the-mineral-intensity-of-the-clean-energy-transition/> (дата обращения: 10.01.2022).

World Mining Data 2024. URL: <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD%202024.pdf> (дата обращения: 13.07.2024).

Yin J., Yin H., Chao Y., Shi H. Energy and tellurium deposits // AIMS Geosciences. 2024. Vol. 10 (1). P. 28–42.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 23.05.2025