

УДК 553.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-10

КРИТИЧЕСКОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ МАЛОУГЛЕРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Александр Лукич Дергачев¹✉, Елизавета Михайловна Шемякина²

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

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

Аннотация. Переход к низкоуглеродным энергетическим технологиям, основанным на использовании возобновляемых источников энергии, в ближайшие десятилетия будет сопровождаться повышением спроса на минеральное сырье. Цель настоящего исследования — определить, какие виды металлов и промышленных минералов будут иметь критическое значение для расширяющегося производства этих технологий.

Ключевые слова: энергетический переход, возобновляемые источники энергии, минеральные ресурсы, критическое минеральное сырье

Для цитирования: Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Критическое минеральное сырье для малоуглеродной энергетики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 3–10.

CRITICAL MINERAL MATERIALS FOR LOW-CARBON ENERGY SYSTEM

Alexander L. Dergachev¹✉, Elizaveta M. Shemyakina²

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

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

Abstract. The transition towards low-carbon energy technologies based on renewable energy sources will come with an increasing demand for raw mineral materials in the coming decades. This investigation is to define what metals and industrial minerals will play a critical role in scaled-up production of these technologies.

Keywords: energy transition, renewable sources of energy, mineral resources, critical mineral raw materials

For citation: Dergachev A.L., Shemyakina E.M. Critical mineral materials for low-carbon energy system. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 3: 3–10. (In Russ.).

Введение. Подписание в 2016 г. Парижского соглашения по климату сделало актуальной задачу широкомасштабного перехода к «чистой» энергетике, построения декарбонизированной экономики, основанной на низкоуглеродных (безуглеродных) возобновляемых источниках энергии (ВИЭ). К ним относятся солнце, ветер, вода, геотермальные источники, биотопливо, энергия которых считается неисчерпаемой. Однако не снижается острота дискуссии о путях достижения поставленных Парижским соглашением целей, и особенно о выбранных темпах энергетического перехода, и хотя к их обсуждению привлекаются специалисты разного профиля, среди участников мало геологов. Между тем именно их задачей является оценить достаточны ли имеющиеся ресурсы, запасы и масштабы добычи минерального сырья для обеспечения быстро возрастающих потребностей новых энергетических технологий в ключевых для них видах металлов и промышленных минералов. Таким оценкам должно предшествовать определение тех видов минерального сырья, потребление которых неизбежно возрастет в связи с переходом к «чистой» энергетике, и прежде всего тех, от которых критическим образом зависит успешное распространение имеющихся и ожидаемых в бли-

жайшей перспективе технологий энергетического перехода.

Критическое минеральное сырье. В качестве критических обычно рассматриваются те виды минерального сырья, которые благодаря своим уникальным свойствам практически незаменимы в важнейших, зачастую новых и «зеленых» технологиях. В определенный момент времени происходит быстрый рост их потребления в тех важнейших областях использования, где они не имеют равноценных субститутов. Нередко оказывается, что месторождения этих видов металлов или неметаллического сырья, до сих пор использовавшихся в очень ограниченных масштабах, редко встречаются, их запасы ограничены, а добыча сильно отстает от растущего спроса и осуществляется в единичных металлогенических провинциях и очень немногими странами, среди которых резко доминируют буквально одна или две. Все вместе это означает высокий риск временной остановки производства новых технологий, если не по причине физического отсутствия запасов требуемых критических минеральных материалов, то из-за несовершенства технологий извлечения их из руд, резких колебаний цен на них или нестабильности поставок по политическим причинам.

Металлы и индустриальное сырье в технологиях энергетического перехода. Перечень металлов и минералов, роль которых в «зеленой» энергетике предлагается обсудить, определяется выбором технологий, которые будут использоваться в период 2021–2050 гг. в электрогенерации, накоплении и хранении электроэнергии и электрическом транспорте. Выбор технологий производился с учетом относительной важности и полноты опубликованных сведений о них. В различных сценариях перехода к преимущественному использованию возобновляемых источников энергии считается, что в «зеленой» энергетике и смежных областях до 2050 г. будут использоваться те же технологии и субтехнологии, что и в 2020 г.

Геотермальная, приливная и волновая электроэнергетика, использование энергии биомассы не приведут к значительному росту потребления минеральных материалов по сравнению с постепенно вытесняемой тепловой электрогенерацией. К тому же по планам суммарная доля этих ВИЭ к 2050 г. составит не более 6% глобальной установленной мощности генерации. Кроме того, в литературе практически отсутствуют сведения об удельном потреблении минеральных материалов в этих видах электрогенерации. В связи с этим в качестве критических для перехода к «зеленой энергетике» будут рассматриваться те виды минеральных материалов, которые должны обеспечивать опережающее развитие ветровой и солнечной электрогенерации, систем накопления и хранения электроэнергии (СНЭ), получаемой из непостоянных источников, а также электрического транспорта.

В дальнейшем речь пойдет о природных минеральных материалах: металлах и индустриальных минералах. По этой причине будут исключены из анализа синтетические материалы, используемые в качестве герметика, и стеклоуглеродные композиты, из которых делают лопасти ветровых турбин.

Энергия солнца для получения электроэнергии используется в солнечных панелях и солнечных системах концентрирующего типа. В **фотовольтаике** в качестве субтехнологий в настоящее время применяются несколько видов солнечных панелей, которые различаются составом полупроводникового материала [Мейтин, 2000; Guirco et al., 2019]. Во всех видах солнечных панелей главными конструкционными материалами являются сталь и Al, а в соединительных проводах в большом количестве применяется Cu. В самых распространенных солнечных панелях на основе моно- или поликристаллического кремния (с-Si) используются стекло (покрывает поверхность панели), синтетический материал (герметик), Al (каркас), Si — один из наиболее широко распространенных элементов в земной коре (фотоэлементы), Ag (контактная сетка), а также Sn, Pb и в очень небольших количествах ряд других металлов [Dominish, 2019].

При изготовлении тонкопленочных солнечных панелей — фотовольтаики второго поколения — на лист стекла, пластика или нержавеющей стали наносятся проводящий слой и один или несколько тончайших (толщиной в диапазоне от нескольких нанометров до нескольких микрометров) слоев того или иного фотоактивного полупроводникового материала.

Солнечные элементы на основе аморфного кремния с изовалентной примесью Ge (a-SiGe) формируются на ленте из нержавеющей стали или на стеклянных подложках. В качестве переднего контакта используется проводящий слой — оксидная пленка из SnO_2 , In_2O_3 или $\text{SnO}_2 + \text{In}_2\text{O}_3$ толщиной 60 нм (потребление In составляет 0,4 г/м² площади панели), а в качестве заднего контакта служит токопроводящая металлическая пластина, покрытая пленкой ZnO.

Для изготовления солнечных модулей на основе теллурида кадмия (CdTe) на стеклянную подложку наносится слой прозрачного проводника из оксидов In и Sn, который служит передним контактом, затем слой сульфида CdS с *n*-проводимостью и сорбирующий слой CdTe с *p*-проводимостью. Задним контактом служит токопроводящая металлическая пластина. При производстве таких панелей кроме Te (6,5 г/м² площади панели) и Cd используется также небольшое количество Ni, Pb, Zn, Sn.

В солнечных панелях, использующих диселенид меди-индия-галлия (CIGS), подложка из незакаленного стекла покрывается токопроводящим слоем Mo (катод), на который последовательно наносятся слой полупроводникового материала $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$, обладающего *p*-проводимостью, промежуточный слой сульфида CdS, вспомогательный слой ZnO, и наконец, слой оксида Zn с примесью Al ($\text{ZnO}:\text{Al}$), который обладает *n*-проводимостью и используется как проводящий электричество анод. Таким образом, при изготовлении тонкопленочных панелей этого типа кроме In (2,9 г/м² площади панели), Ga (0,53 г/м²), Se и Cu используются также Mo, Cd, Te, Zn и Sn.

Концентрационные солнечные электростанции, использующие длинные параболические зеркала или линейные отражатели Френеля, требуют стали и Al как основных материалов для опорных конструкций, а также Cu для кабелей, насосов, электромоторов и генераторов. Но важнейшим металлом для отражающих зеркал является Ag (1 г/м² площади зеркала), обладающее наивысшей отражательной способностью среди всех металлов [Moss et al., 2011; Grandel et al., 2016].

В **ветроэнергетике** для преобразования энергии ветра в электроэнергию в настоящее время используются две основные субтехнологии: ветроустановки с низкоскоростными (об/мин) турбинами с прямым приводом (< 80), а также средне- (> 80) и высокоскоростные (> 900) редукторные турбины. Первые являются более дорогостоящими, использу-

ют сильные редкоземельные постоянные магниты, но имеет меньший размер, легче и реже выходят из строя, и поэтому предпочитают в крупных офшорных ветровых парках, где ветры более сильные и техническое обслуживание установок затруднено. В типичном случае ветровые установки обоих типов представляют собой трехлопастные ветровые турбины (редукторные или прямого привода), помещенные в гондолы из нержавеющей стали или стекловолокна, и установленные на башню из оцинкованной стали или алюминиевых сплавов на основании из бетона, армированного сталью. Механические компоненты, помещенные в гондолу (валы, тормозная система, редуктор) делаются из чугуна, хромистой и низколегированной стали. Для изготовления генератора необходимы Cu и Al, а для электронных компонентов и соединительных кабелей — Al, Pb, Cu, Sn и низколегированная сталь. В состав ветровых турбин в небольших количествах входят также Mn, Ni, Mo и Co. В низкоскоростных генераторах с прямым приводом отсутствует редуктор, но в них используются постоянные магниты, от силы которых зависит мощность генераторов.

В настоящее время самыми сильными являются редкоземельные постоянные магниты, получаемые методом порошковой металлургии из сплава NdFeB. Они обладают непревзойденными свойствами: высокой коэрцитивной силой (материал может использоваться в зоне действия внешних магнитных полей), высокими усилием на отрыв и показателем остаточной намагниченности (магнитный сплав теряет всего несколько процентов своей силы за столетие — «вечный магнит»). Для защиты от коррозии на поверхность магнита наносятся пленки Cu, Ni, Zn или любое гальваническое покрытие, а в составе сплава для улучшения его стойкости к коррозии и повышения коэрцитивной силы Nd частично заменяется на Dy, Pr, Tb и дополнительно вводятся Co, Cu, Nb, Al, Pb. В современных ветровых установках постоянные магниты имеют массу до 4 т и содержат в среднем (%) 66 Fe, 28–31 Nd, 4,4 Dy, 1 B, значительные количества Pr и Tb [Grandel et al., 2016; Rabe et al., 2017]. Те же элементы находят применение в постоянных магнитах для внутренних креплений в ветровых установках.

Системы накопления и хранения электроэнергии (СНЭ) призваны компенсировать невозможность генерировать электроэнергию в ночное время (для гелиоэнергетики) или в безветренную погоду (для ветроэнергетики). Использование кислотно-свинцовых аккумуляторов в настоящее время сокращается, а внедрение проточных окислительно-восстановительных батарей, использующих в качестве электролита раствор солей ванадия, только начинается. Считается, что в обозримом будущем среди разнообразных систем накопления и хранения электроэнергии будут резко доминировать Li-ионные автомобильные аккумуляторы и стационарные (сетевые и децентрализованные)

СНЭ. Различные доли в их суммарную емкость будут вносить литий-никель-марганец-кобальт-оксидные ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$, NMC; 60%), литий-марганец-оксидные (LiMn_2O_4 , LMO; 20%), литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные (LiNiCoAlO_2 , NCA; 15%) и литий-железо-фосфатные (LiFePO_4 , LFP; 5%) аккумуляторы. При их изготовлении используются Al и Cu (в составе катода и анода соответственно), Li и Ni, Co, Mn, (в составе производных Li на алюминиевой фольге). Традиционным анодным материалом в Li-ионных аккумуляторах является графит, нанесенный на медную фольгу, который добывается из недр (55%) или получается искусственным путем.

На **электромобили**, как гибридные и подключаемые, так и работающие исключительно на аккумуляторных источниках питания, в рассматриваемый период будет приходиться большая часть суммарной мощности СНЭ. Естественным поэтому является включение в анализ минеральных материалов для создания не только аккумуляторов, но и постоянных магнитов на основе сплавов NdFeB для моторов электромобилей (Nd с добавкой Dy для повышения жаропрочности, а также Pr, Tb, Ga), силовой электроники и кабелей (Ga, In, Ge, Ag, Pd, Au).

Критическое минеральное сырье для технологий энергетического перехода. В 2021–2050 гг. в связи с энергетическим переходом дополнительное использование стали и стекла в фотовольтаике, и чугуна, стали и цемента в ветровых генераторах составит многие десятки и сотни миллионов тонн. Однако для их получения требуются относительно дешевые и широко распространенные виды полезных ископаемых — стекольное сырье, глины и карбонатные породы, железные руды. Их производство рассредоточено по множеству стран, а текущие масштабы их ежегодной добычи многократно превышают суммарные за 30 лет дополнительные потребности в них со стороны новых энергетических технологий. Во многих из них находят применение Zn, Cu, Al, Cr, Mn, Mo, Pb, Sn (табл. 1). Однако эти металлы производятся в больших количествах, и любая временная нехватка их для производства «зеленых» технологий относительно легко компенсируется за счет перераспределения их между многочисленными традиционными областями применения металлов.

Из перечисленных минеральных материалов определению критических в наиболее полной мере отвечают In, Cd, Ge, Ga, Te, Se и отчасти Ag (в обеих технологиях солнечной электрогенерации и электромобилях), Dy, Nd, Pr, Tb (в ветровых установках и электромобилях), а также Ni, Co, Li и графит (в СНЭ). Они и (или) их производные обладают уникальными свойствами, и не могут быть заменены без неприемлемого снижения эксплуатационных характеристик оборудования, и это обуславливает высокую зависимость производства технологий энергетического перехода от стабильности цен и непрерывности поставок этих видов минеральных материалов. В настоящее время эти виды сырья

Таблица 1

Использование металлов и промышленных минералов в важнейших технологиях энергетического перехода по [Moss et al., 2011; Ohrlund, 2012; Grandell et al., 2016; World Bank, 2017; Dominish et al., 2019; Carrara et al., 2020]

Металлы и минералы	Солнечная фотовольтаика				Солнечные системы концентрирующего типа	Ветровые турбины		Системы накопления электроэнергии	Электромобили и гибриды	
	c-Si	a-SiGe	CIGS	CdTe		с редуктором	прямого привода		моторы	силовая электроника
Алюминий	+	+	+	+	+	+	+	+		
Галлий			++	+					++	++
Германий		++								++
Графит								++		
Диспрозий						+	++		++	
Золото										+
Индий		++	++	+						++
Кадмий			+	++						
Кобальт								++		
Литий								++		
Марганец						+	+			
Медь	+	+	+	+		+	+	+		
Молибден			+			+	+			
Неодим						+	++		++	
Никель				+		+	+	++		
Олово	+	+	+	+						
Палладий										+
Празеодим						+	++		++	
Свинец	+			+						
Селен			++							
Серебро	++			+	++					+
Сталь/чугун	+	+	+	+		+	+			
Теллур			+	++						
Тербий						+	++		++	
Хром						+	+			
Цинк			+	+		+	+			

Примечание: двойным символом отмечены виды сырья, имеющие критическое значение для определенных технологий энергетического перехода.

используются в очень ограниченных количествах. К 2050 г. спрос на них может возрасти в десятки раз именно за счет использования в технологиях энергетического перехода, которые превратятся в главную область использования многих из них. Поэтому недостаток предложения, например, Ga или Ge не сможет компенсироваться перераспределением их потребления между различными отраслями. Между тем ограничения или перебои в поставках сырья могут вызываться различными причинами. Среди них важное значение имеют, например, недостаток запасов, невозможность для горно-металлургического комплекса обеспечить требуемый уровень добычи, а также различные труднопредсказуемые политические причины.

При уровне добычи критических минеральных материалов, достигнутом в 2020 г., обеспеченность запасами большинства из них исчисляется многими

десятилетиями (табл. 2). Так, даже с учетом неполноты извлечения металлов в коммерческую продукцию, запасы Te, по крайней мере теоретически, были бы достаточны для удовлетворения потребностей мировой экономики в течение 30 лет, Co — 40, Li — 173, Se — 31 года и т.д. Следует помнить, что для каждого из этих видов сырья существуют выявленные ресурсы, превышающие нынешние запасы, например, для Ni и Co в 3,3, Li — в 4, In — в 7,5 раза. По мере необходимости эти ресурсы в результате геологоразведочных работ могут быть переведены в категорию запасов.

С другой стороны, и спрос на критические минеральные материалы (а значит, и их добыча) в предстоящий период будет быстро расти, в том числе в связи с потреблением в производстве технологий энергетического перехода. Предварительные расчеты показывают, что в текущее тридцатилетие

(2021–2050) спрос на Ni, например, возрастет примерно в 2,1, Co — в 4, Li — в 8, Te — в 18 раз и т.д. Для сравнения, в тот же период спрос на Cu, Zn, Pb, Sn возрастет примерно в 1,7–1,9 раза. Соответствующим образом будет возрастать и скорость истощения запасов критических минеральных материалов. В какой мере оно сможет стать сдерживающим фактором в развитии «зеленой» энергетики и электромобилестроении, будет зависеть в том числе от способности геологической отрасли обеспечить опережающий прирост запасов.

В ближайшие десятилетия наличие запасов и добыча этих минеральных материалов будут определять темпы энергетического перехода и соотношения между применяемыми технологиями и субтехнологиями. С другой стороны, технологии энергетического перехода станут важнейшими рынками для критических материалов, где будет потребляться значительная, а иногда и большая часть их добычи.

Ограниченность и неравномерное распределение запасов ключевых видов полезных ископаемых обуславливают риски прекращения поставок. По данным [Mineral, 2022], от 21 до 46% запасов каждого вида минерального сырья, критического для технологий энергетического перехода, сосредоточено в одной стране (рис. 1). Так, по 22% мировых запасов Ni имеют на своей территории Австралия и Индонезия. Почти 26% запасов Se и 21% запасов Te подсчитаны на месторождениях Китая, а 23% запасов Ag — на гидротермальных жильных и скарновых месторождениях в Перу. Около 46% мировых запасов Co приходится на медно-кобальтовые месторождения в протерозойских сланцах Центрально-Африканского медного пояса в ДРК. Около 52% мировых запасов Mo приходится на медно-кобальтовые месторождения в протерозойских сланцах Центрально-Африканского медного пояса в ДРК. Около 52% мировых запасов Co приходится на медно-кобальтовые месторождения в протерозойских сланцах Центрально-Африканского медного пояса в ДРК. Около 52% мировых запасов Co приходится на медно-кобальтовые месторождения в протерозойских сланцах Центрально-Африканского медного пояса в ДРК.

Рис. 1. Распределение по странам запасов минерального сырья, критически важного для производства технологий энергетического перехода (2020 г.), по [Mineral, 2022]

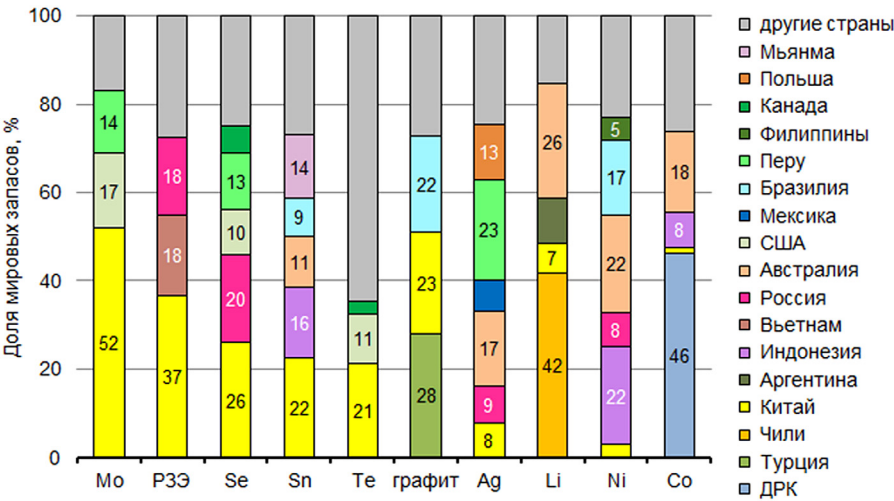


Таблица 2

Ресурсы, запасы и рудничная добыча металлов, используемых в технологиях энергетического перехода (по данным на 2020 г.), по [Mineral, 2021; Grandell et al., 2016]

Металл / минерал	Ресурсы, тыс. т	Запасы, тыс. т	Рудничная добыча, тыс. т*	Обеспеченность добычи запасами, годы**
Co	25 000	7600	129	43
Li	89 000	22 000	87	184
Ag	1308	530	26	15
Ni	300 000	95 000	2492	28
Cu	2 100 000	880 000	20 788	31
Al		5 984 000	65 352	67
Zn	1 900 000	250 000	12 608	14
Se	1312	550	3	34
Te	525	220	0,4	45
Ga	3750	1600	0,3	69
Ge	950	125	0,1	10
In	253	33	0,9	16
Cr	12 000 000	570 000	8186	51
Cd	9500	1250	25	15
Pb	2 000 000	90 000	4746	14
Mo	25 000	16 000	284	41
Fe		85 000 000	1 522 559	41
Sn		4900	277	13
Mn		1 500 000	19 277	57
Dy	670	480	1,6	219
Pr	2800	2000	5,9	247
Nd	11 200	8000	20	292
Tb	420	300	0,32	683
графит	800 000	32 0000	940,5	248

Примечания. * — для Se, Te, In, Cd, Ga, Ge приведено производство очищенных металлов. ** — с учетом коэффициентов извлечения металлов в концентраты.

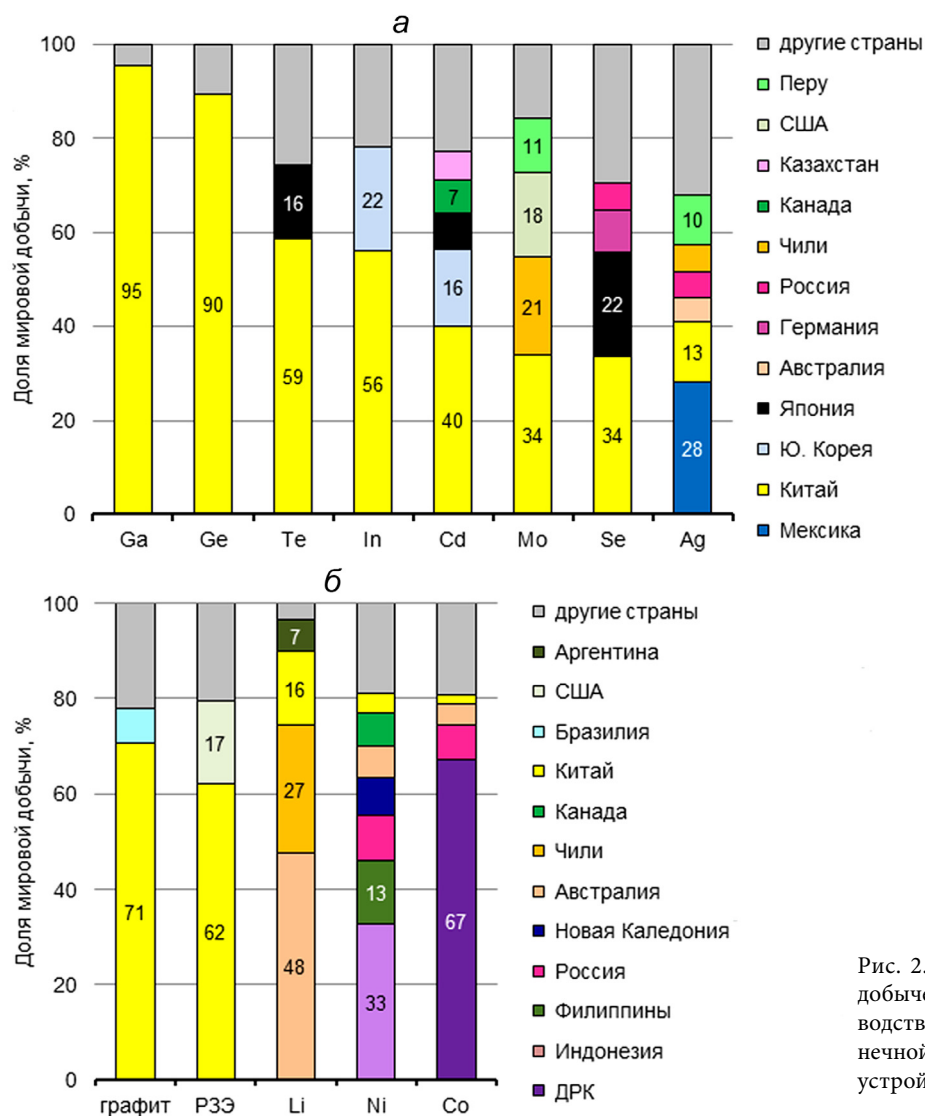


Рис. 2. Доли стран в мировой рудничной добыче металлов (металлургическом производстве для Cd, Ge, In, Te, Se и Ga) для солнечной фотовольтаики (а), аккумуляторных устройств, ветровых установок и электромобилей (б), по [World, 2022]

извлекаемыми попутно из свинцово-цинковых руд, и опережает по этому показателю Китай (18%).

Почти 37% мировых запасов оксидов P3Э сосредоточены в Китае (1-е место в мире) и по 18% приходятся на долю Бразилии, России и Вьетнама. Китай занимает 2-е место в мировом рейтинге по запасам графита (23% мировых), незначительно отставая от Турции (28%), но опережая Бразилию (22%).

Китай значительно превосходит ближайших конкурентов по рудничной добыче (доля мирового рудничного производства, %) графита (70,7) и P3Э (60,0), и уступает лишь Мексике по производству Ag (12,9). Однако доминирующее положение Китая в обеспечении технологий энергетического перехода минеральными материалами определяется не только крупными запасами, но и лидерством в получении металлов.

Рудничное (металлургическое для Cd, Ge, In, Te, Se и Ga) производство критических металлов сконцентрировано в еще более высокой степени, чем запасы (рис. 2). Характеризующий степень концентрации индекс Херфендаля-Хиршмана (ННП) для большинства из них принимает значения от умерен-

но высокого 2079 для Cd до рекордного 8062 для Ge [World., 2022]. Хотя доля Китая в мировых запасах Ga, Se, Te в 2020 г. составляла только около 3%, эта страна лидировала по выпуску (доля мирового металлургического производства, %) очищенных Ga (95,4), Te (58,6), Se (33,6), и кроме того, производила больше всех Ge (89,6), In (55,9), Cd (40,1) из собственных и импортных бокситов, медных и цинковых концентратов. Располагая на своей территории всего 6,8% мировых запасов Li в подземных рассолах и пегматитовых месторождениях (4-е место в мире), Китай уступает лишь Австралии по его рудничной добыче (16% мировой), лидирует в мире по производству металла и его соединений (80%), а также по производству Li-ионных аккумуляторов (суммарная емкость выпускаемых в Китае СНЭ составляет 60% мировой). При наличии незначительных запасов Co на национальной территории (1,7% мировых) китайские компании получили доступ к ресурсам недр ДРК и из импортного сырья производят больше всех в мире металлического Co в разной форме (68,2%). Китайская металлургия обеспечивает (доля мирового производства, %) 33,8 Mo, а также

50,4 ферроникеля, 24,1 металлического Ni и 56,7 его соединений при том, что национальные запасы этого металла составляют всего 2,9% мировых.

Вызванный переходом к преимущественному использованию ВИЭ многократный рост потребления большинства перечисленных минеральных материалов создает возможности для ускорения экономического роста развивающихся стран, имеющих на своей территории крупные запасы и ресурсы соответствующих полезных ископаемых и лидирующих по их добыче. В их число входят ДРК, Индонезия и Куба (Со), Бразилия, Филиппины, Индонезия (Ni), Вьетнам и Китай (P3Э), Турция, Бразилия, Мадагаскар (графит), Чили, Боливия и Аргентина (Li) и др. Однако главным выгодополучателем, безусловно, станет Китай.

Казавшийся безопасным в эпоху глобализации, главным образом политически мотивированный выбор наиболее высоких темпов перехода к преимущественному использованию ВИЭ сделан странами, практически лишенными собственных источников критического сырья для технологий энергетического перехода. Высокие уровни концентрации запасов и мирового производства многих видов критически важной минеральной продукции означают для них высокие риски прекращения ее поставок по политическим причинам.

В странах ЕС и Японии, практически лишенных собственных запасов важнейших минеральных ресурсов, и даже в США китайское лидерство в получении критических минеральных материалов рассматривается как один из факторов риска для развития «зеленых» энергетических технологий и производства электромобилей.

Для американской промышленности Китай является важным поставщиком (доля китайского сырья во внутреннем потреблении США, %) P3Э в виде металлов и сплавов (78), а также Ga (53), графита (33), In (31), Ge (25), Se и Te (15), Cd (10). В США и странах ЕС зависимость от китайских редкоземельных металлов рассматривается как «стратегическая уязвимость». Руководством стран признается, что даже кратковременные сбои в поставках из Китая Nd, Tb, Pr, Dy, например, по политическим причинам могут остановить производство постоянных магнитов не только для ветровых турбин, но и для двигателей гибридов и электромобилей [Moss et al., 2011, 2013; Ohrlund, 2011; US DOE, 2011].

Действительно, в последние годы использование поставок минеральных материалов для достижения политических целей превращается в новую норму. Достаточно вспомнить политически мотивированный отказ Австралии в 2014 г. от поставок урановых руд в Россию по договору, подписанному в 2006 г. В последние годы нередко в качестве инструмента давления для достижения своих внешнеполитических или экономических целей различные страны использовали в том числе и рассмотренные выше типы минерального сырья. Так, в 2010 г. Китай

вынудил Японию пойти на политические уступки в ходе так называемого рыболовного конфликта, пригрозив сократить экспорт в эту страну редкоземельных металлов, а в 2019 г. аналогичным образом нанес ответный удар в торговой войне против США. С середины апреля 2022 г. по политическим причинам заблокировали поставки в Россию канадские компании, которые из озерной рапы на месторождениях в сарах «Литиевого треугольника» в Чили и Аргентине добывают Li, критически важный для электромобилестроения и СНЭ.

Крупнейшие страны-поставщики, используя свое доминирующее положение на рынке критического минерального сырья, могут не только укреплять свое влияние в международных делах, но и влиять на цены на поставляемую ими продукцию. Хорошими иллюстрациями этого являются резкое удорожание оксидов P3Э, над поставками которых на мировой рынок сохраняется контроль китайского правительства, а также рост цены на Li, которая всего за год с апреля 2021 г. возросла на 423%. Аналогичный тренд демонстрируют цены на другие критические материалы. В конечном счете сохранение такой тенденции может привести к росту цен на готовые изделия и внести вклад в «зеленую» инфляцию.

Заключение. В эпоху энергетического перехода статус критически важных минеральных материалов приобретают P3Э (Nd, Pr, Dy, Tb), In, Ga, Se, Te, Ge, Ag, Co, Ni, Li и графит. Они и (или) их производные обладают уникальными свойствами и не могут быть эффективно заменены субститутами, а их потребление в предстоящее 30-летие будет возрастать быстрыми темпами. Для самих этих критических материалов технологии энергетического перехода станут крупнейшими рынками.

Высокие уровни концентрации запасов и мирового производства многих видов критического минерального сырья предполагают высокий риск прекращения их поставок, в частности, по политическим причинам. Переход к политике нулевой толерантности к углеродному следу, и как следствие, расширяющееся использование низкоуглеродных технологий, требующих критических минеральных материалов, открывает новые возможности для экономического роста и усиления политического влияния целого ряда развивающихся стран, экономика которых ориентирована на добычу и экспорт критического минерального сырья. Среди них наибольшие преимущества получит Китай, обладающий большими запасами и лидирующий по рудничному и металлургическому производству многих видов критических минеральных материалов. Следует внимательно изучить возможности участия России в обеспечении энергетического перехода минеральным сырьем.

Удорожание критических материалов для технологий энергетического перехода создает дополнительные риски и может поставить мировую эконо-

мику перед выбором между отказом от углеродного следа и энергетической безопасностью.

Благодарности. Авторы благодарны доктору технических наук, профессору кафедры геологии и маркшейдерского дела Горного института МИСиС

В.В. Мосейкину и доктору геолого-минералогических наук, заведующему кафедрой общей геологии и геокартирования РГГРУ (МГРИ), профессору В.В. Дьяконову за внимательное прочтение рукописи статьи и сделанные ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы. Пусть всегда будет солнце // Электроника: наука, технология, бизнес. 2000. № 6. С. 40–47.
2. Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B., Pavel C. Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system // Brussels: European Parliament. 2020. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET\(2011\)471604_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET(2011)471604_EN.pdf) (дата обращения: 01.01.2023).
3. Dominish E., Teske S., Florin N. Responsible minerals sourcing for renewable energy // Sydney: Institute for sustainable futures, University of Technology. 2019. URL: https://earthworks.org/assets/uploads/2019/04/MCEC_UTS_Report_lowres-1.pdf (дата обращения: 14.06.2022).
4. 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.
5. Guirco D., Dominish E., Florin N. et al. Requirements for minerals and metals for 100% renewable scenarios // Achieving the Paris Climate Agreement Goals. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG. 2019. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-05843-2_11 (дата обращения: 10.01.2022).
6. Grandell, L., Lehtila A., Kivinen M. et al. Role of critical metals in the future markets of clean energy technologies // Renewable Energy. 2016. Vol. 95. P. 53–62.
7. Mineral Commodities Summaries 2022. URL: <https://doi.org/10.3133/mcs2022> (дата обращения: 09.09.2022).
8. Moss R.L., Tzimas E., Kara H. et al. Critical metals in strategic energy technologies: Assessing rare metals as supply — chain bottlenecks in low-carbon energy technologies // Publications Office of the European Union. 2011. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2239d6b7-cda8-4570-a9f0-13ad60ce3f11/language-en> (дата обращения: 05.04.2022).
9. Moss R. L., Tzimas E.P., Willis J. et al. Critical minerals in the path towards the decarbonisation of the EU energy sector: Assessing rare minerals as supply chain bottlenecks in low-carbon energy technologies // JRC Scientific and Policy Report. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2013. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC82322> (дата обращения: 01.01.2023).
10. Öhrlund I. Future metal demand from photovoltaic cells and wind turbines: Investigating the potential risk of disabling a shift to renewable energy systems // European Parliament. 2011. URL: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET\(2011\)471604_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/etudes/join/2011/471604/IPOL-JOIN_ET(2011)471604_EN.pdf) (дата обращения: 05.04.2022).
11. Rabe W., Kostka G., Smith S.K. 'China's supply of critical raw materials: risks for Europe's solar and wind industries?' // Energy Policy. Vol. 101. 2017. P. 692–699.
12. US DOE (U.S. Department of Energy) 2011. Critical materials strategy // DOE. 2011. URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf (дата обращения: 01.01.2023).
13. World Bank 2017. The growing role of minerals and metals for a low carbon future // Washington, DC: World Bank. 2017. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/28312> (дата обращения: 10.01.2022).
14. World Mining Data 2022. URL: <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD2022.pdf> (дата обращения: 13.07.2022).

Статья поступила в редакцию 07.03.2023,
одобрена после рецензирования 22.03.2023,
принята к публикации 22.07.2023