

УДК 553.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-2-3-16

## ЗАПАСЫ КРИТИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОТРЕБНОСТИ В НЕМ В ЭПОХУ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЕРЕХОДА

Александр Лукич Дергачев<sup>1</sup>✉, Елизавета Михайловна Шемякина<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; shemyakina\_em@pfur.ru

**Аннотация.** На основе компьютерной модели выполнена оценка будущей дополнительной потребности в минеральных материалах для производства ветровых турбин, солнечных панелей, систем накопления и хранения электроэнергии и электромобилей, необходимых для реализации сценария перехода к малоуглеродной энергетике, предложенного Международным энергетическим агентством. Спрос на некоторые критически важные металлы и индустриальные минералы был сопоставлен с их имеющимися промышленными запасами и ресурсами. Поставки критического минерального сырья для некоторых технологий энергетического перехода могут явиться новым вызовом устойчивому развитию минерально-сырьевой базы мировой экономики, а в перспективе оказаться сдерживающим фактором в использовании возобновляемых источников энергии.

**Ключевые слова:** энергетический переход, возобновляемые источники энергии, критическое минеральное сырье, запасы минерального сырья, минеральные ресурсы

**Для цитирования:** 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.

## RESERVES OF CRITICAL MINERAL MATERIALS AND ADDITIONAL DEMAND FOR THEM IN ERA OF ENERGY TRANSITION

Alexander L. Dergachev<sup>1</sup>✉, Elizaveta M. Shemyakina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alderg51@yandex.ru✉

<sup>2</sup> RUDN University, Moscow, Russia; shemyakina\_em@pfur.ru

**Abstract.** Based on a computer model, an assessment was made of the future additional demand for minerals for the production of wind turbines, solar panels, energy storage systems and electric vehicles necessary to implement the IEA 2DS scenario for the transition to low-carbon energy. Demand for some critical metals and industrial minerals has been compared to their available economic reserves and resources. The supply of critical mineral materials for some energy transition technologies may pose a new challenge to the sustainable development of the mineral base of the world economy, and in the future become a deterrent to the use of renewable energy sources.

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

**For citation:** Dergachev A.L., Shemyakina E.M. Reserves of critical mineral materials and additional demand for them in era of energy transition. *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 2: 3–16. (In Russ.).

**Введение.** В ноябре 2022 г. истекли шесть лет после вступления в силу Парижского соглашения по климату. Согласно Ст. 2, его целью является активизировать осуществление Рамочной конвенции ООН по изменению климата, и в частности, удержать рост глобальной средней температуры «намного ниже» 2 °C сверх доиндустриальных уровней и «приложить усилия» для ограничения роста температуры величиной 1,5 °C [Парижское ..., 2016].

Для достижения этой цели 196 сторон Соглашения обязались стремиться к прохождению пика глобальной эмиссии парниковых газов «настолько скоро, насколько это окажется возможным» и к построению климатически нейтрального мира к 2050 г.

По данным Международного энергетического агентства (IEA), в 2017 г. 41% эмиссии углекислого газа в атмосферу (13,6 млрд т в год) был обусловлен применением ископаемого топлива (уголь, нефть, природный газ) в электрогенерации [IEA, 2019]. Это делает актуальной задачу построения декарбонизированной экономики. Как следствие, в гражданском обществе и средствах массовой информации нередко высказывается мнение, что в низкоуглеродном будущем минеральные ресурсы будут постепенно утрачивать свое былое значение.

Однако анализ показывает, что «зеленая» энергетика, основанная на возобновимых источниках энергии (ВИЭ), характеризуется намного большей

емкостью в отношении минеральных материалов (металлов, индустриальных минералов), чем тепловая электроэнергетика. В связи с этим переход к преимущественно низкоуглеродным источникам энергии должен быть поддержан увеличением добычи по крайней мере некоторых видов полезных ископаемых, а следовательно, увеличением нагрузки на невозобновляемые минеральные ресурсы. Любое замедление в динамике их запасов и отставание темпов роста добычи критически важных видов минерального сырья от спроса на них, возрастающего в связи с энергетическим переходом, означало бы уменьшение их предложения на мировом рынке. Следствием стали бы не только замедление темпов роста и масштабов использования тех или иных видов генерации, альтернативных тепловой электроэнергетике, но и возросшие риски в достижении целей Парижского соглашения, ограничение доступа к электроэнергии для значительной части человечества и угроза энергетической безопасности.

Публикации, в которых рассматриваются ближайшие последствия дополнительного потребления минеральных материалов, связанного с переходом к низкоуглеродной энергетике в 2021–2050 гг., пока еще немногочисленны и оставляют много вопросов. В них анализируются в основном будущие потребности некоторого комплекса «чистых» энергетических технологий в минеральных материалах, но не сама возможность их удовлетворения и не цена, которую придется заплатить за нее. В этом смысле они скорее представляют собой сигнал для инвесторов относительно будущего спроса на продукцию горнодобывающей промышленности. В то же время примеры инженерных расчетов, тем более анализа геологами достаточности существующей мировой минерально-сырьевой базы (МСБ) для удовлетворения будущего спроса на минеральное сырье, практически отсутствуют.

В предыдущих работах авторов уже рассматривался вопрос о том, какие именно минеральные материалы будут играть ключевую роль в развитии тех или иных технологий энергетического перехода [Дергачев, Шемякина, 2023]. Целью данного исследования является определить, в каких количествах они будут востребованы альтернативной энергетикой будущего, а также в какой мере нынешнее состояние мировой минерально-сырьевой базы экономики адекватно возрастающим потребностям в первичном минеральном сырье.

**Основные предположения и методика расчетов потребления минерального сырья.** Низкоуглеродная энергетика в период с 2021 по 2050 гг. в дальнейшем анализе рассматривается как условно-замкнутая система. В ней на фоне роста установленной мощности электрогенерации, емкости систем для накопления и хранения электроэнергии (СНЭ) и численности электромобилей изменяются технологии, соотношения между субтехнологиями и их металлоемкость. В конце службы соответствующих

устройств образуется определенное количество лома, из которого извлекается часть металлов, и вторичные металлы полностью используются в этой же системе.

Для достижения целей исследования была разработана компьютерная модель, которая позволяла рассчитывать потребление индустриальных минералов и металлов в электрогенерации, СНЭ и электромобильном транспорте как относящееся к определенному году, так и суммарное за 2021–2050 гг.

Составление модели потребовало выбора технологий и субтехнологий, которые обеспечивали бы выполнение выбранного сценария энергетического перехода и определения соотношения между ними. Вводимые в модель исходные данные включали прежде всего возрастающие со временем установленные мощности электрогенерации каждого вида, суммарную емкость разнообразных СНЭ и количество электромобилей в каждый год рассматриваемого периода. Для каждой из выбранных технологий был определен перечень минеральных материалов, имеющих критическое значение. Учитывалось также удельное потребление материалов в разнообразных технологиях, срок службы устройств для генерации, накопления и хранения энергии и электромобилей, доля металлов в составе лома, извлекаемая для повторного использования. Вместе с тем модель предусматривает возможность учета изменений в соотношениях между субтехнологиями и их удельной материлоемкости в рассматриваемый период.

Выбор сценария перехода к низкоуглеродной электроэнергетике из известных в настоящее время [World Bank, 2017] при составлении модели имел принципиальное значение. Наиболее широко обсуждаемые сценарии разработаны Международным энергетическим агентством (IEA) (сценарии 4DS, 2DS, RTS, B2DS) [IEA, 2016, 2017] и Международным агентством по возобновляемым источникам энергии (IRENA) (сценарии Ref и REmap) [IRENA, 2019]. Важнейшим различием между сценариями является верхний предел роста средней глобальной температуры к 2100 г. Наиболее амбициозными являются сценарии B2DS (1,75 °C) и REmap («намного ниже 2 °C»). Сценарий 4DS нередко используется для сравнения с другими [World Bank, 2020], он предусматривает сохранение нынешнего тренда в электроэнергетике и вообще не требует практически никакого сдвига в сторону ВИЭ. Кроме того, сценарий 4DS и оба сценария IRENA учитывают лишь изменения в производстве электроэнергии, требуемые для выполнения Парижского соглашения, но не в СНЭ или электромобильном транспорте.

В дальнейшем анализируется сравнительно консервативный сценарий IEA 2DS, в котором рост средней глобальной температуры с 50%-ной вероятностью не превысит 2 °C до 2100 г. [World Bank, 2020]. При этом предполагается рост установленной мощности электрогенерации в мире с 7576 ГВт в 2020 г. примерно до 14 000 ГВт в 2050 г. при одновременном

увеличении доли ВИЭ с 37% до 74% установленной мощности электрогенерации [World Bank, 2017; IRENA, 2021] (рис. 1). Кроме того, в этом сценарии в 2021–2050 гг. должна быстро возрасти глобальная емкость стационарных и мобильных аккумуляторных систем, а также численность гибридов и электромобилей.

Количество разнообразных минеральных материалов, которые могут дополнительно потребоваться в связи с переходом к технологиям «зеленой» энергетики, в модели определялось по годам отдельно для каждой технологии и субтехнологии и для каждого из используемых в них металлов и индустриальных минералов.

Выбор технологий основывался на предположении, что до 2050 г. в электрогенерации, накоплении и хранении электроэнергии и электрическом транспорте будут использоваться технологии и субтехнологии, известные в 2020 г., хотя, возможно, и в изменяющихся пропорциях. Поскольку предугадать соотношения между ними не представляется возможным, результаты моделирования следует рассматривать как иллюстративные. При этом по сценарию IEA 2DS в 2021–2050 гг. значительно возрастет установленная мощность солнечной и ветровой электрогенерации (примерно в 6,2 и 4,2 раза соответственно).

В ветроэнергетике моделью предусмотрено изменение соотношений между двумя субтехнологиями. Доля высокосреднескоростных установок с редукторами в 2020 г. составляла 80% из 732 ГВт установленной мощности ветровой электрогенерации [IRENA, 2020]. Согласно сценарию 2DS она будет возрастать на 4,7% в год и в 2050 г. ее доля составит 75% (табл. 1). Установленная мощность генерации ветрогенераторов с прямым приводом, использующих сильные постоянные магниты, в течение 30 лет (2021–2050 гг.) будет возрастать в среднем примерно на 5,7%. Такими же темпами предполагается и рост количества минеральных материалов, необходимых для расширения генерирующих мощностей в соответствующих субтехнологиях.

В фотовольтаике на солнечные панели из кристаллического кремния (c-Si) в 2020 г. приходилось 95% из 710 ГВт установленной мощности электростанций на солнечных батареях. Доли более тонких, легких, эффективных и дешевых солнечных элементов второго поколения, использующих в качестве полупроводниковых соединений аморфный кремний с изовалентной примесью Ge (a-SiGe), теллурид кадмия (CdTe) и диселенид меди-индия-галлия (CIGS), составляли примерно по 1,7%. В модели предполагается, что к 2050 г. на панели из кристаллического кремния будет приходиться 50% из 3780 ГВт установленной мощности электростанций на солнечных панелях (рост на 3,5% в год). Установленная мощность тонкопленочных панелей будет возрастать на 14,2% в год, при этом панели, использующие в качестве полупроводниковых со-

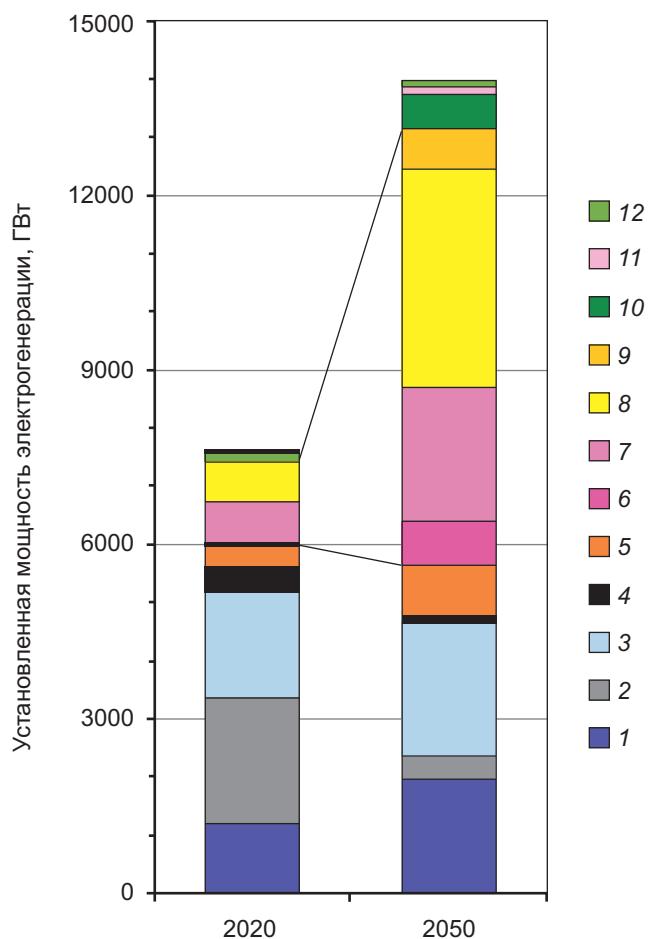


Рис. 1. Структура установленной мощности электрогенерации в мире в 2020 и 2050 гг. по сценарию IEA 2DS (по [IEA, 2016]). 1 — гидроэнергетика; 2—4 — тепловая электроэнергетика: 2 — уголь, 3 — природный газ, 4 — нефть; 5 — ядерная энергетика; 6—7 — ветровая энергетика: 6 — низкоскоростные турбины, 7 — высокосреднескоростные турбины; 8—9 — гелиоэнергетика: 8 — солнечная фотовольтаика, 9 — концентрационные солнечные системы; 10 — биоэнергетика; 11 — геотермальная энергетика; 12 — приливная и волновая электроэнергетика

единений a-SiGe, CdTe и CIGS, будут вносить в нее равные доли (по 16,7%).

Предполагается, что в солнечной электрогенерации возрастающее распространение будут получать *солнечные системы концентрирующего типа*. В 2020 г. на долю оборудования с параболическими зеркалами и линейными отражателями Френеля приходилось соответственно 90% и 10% из 6,5 ГВт установленной мощности солнечных систем концентрирующего типа. Базовый вариант расчетов на основе модели предполагает, что в 2021–2050 гг. их установленная мощность будет возрастать на 16,7% в год и достигнет в конце периода 670 ГВт (15% установленной мощности солнечной электрогенерации) при сохранении соотношения 9:1 между субтехнологиями [IEA, 2016; 2017].

Для оценки материоемкости низкоуглеродной энергетики важно, что использование электроэнергии из непостоянных источников требует исполь-

Таблица 1

## Динамика развития технологий в альтернативной энергетике и смежных областях

Технологии / субтехнологии	Установленная мощность генерации <sup>1</sup>				Рост % в год		
	2020		2050				
	ГВт	%	ГВт	%			
Солнечная электрогенерация							
Солнечные панели всего	709,7	100	3780	100	5,7		
c-Si	674	95	1890	50	3,5		
CIGS	11,8	1,7	631,3	16,7	14,2		
CdTe	11,8	1,7	631,3	16,7	14,2		
a-Si	11,8	1,7	631,3	16,7	14,2		
Солнечные системы концентрирующего типа (CSP) всего	6,5	100	670	100	16,7		
с параболическими зеркалами	5,8	90	603	90	16,7		
с линейными отражателями Фринеля	0,7	10	67	10	16,7		
Ветровая электрогенерация							
Ветровые установки всего	732,4	100	3080	100	4,9		
с высокоскоростными генераторами	585,9	80	2310	75	4,7		
с низкоскоростными генераторами	146,5	20	770	25	5,7		
Накопление и хранение электроэнергии <sup>2</sup>							
Технологии / субтехнологии	Суммарная емкость, ГВт-час			Рост (% в год)			
	2020	2050					
Автомобильные аккумуляторы, стационарные сетевые и децентрализованные аккумуляторные системы	2930	22270		7,0			
Электромобили <sup>3</sup>							
Технологии / субтехнологии	Численность электромобилей, млн ед.			Рост (% в год)			
	2020	2030	2050				
Моторы и силовая электроника	12,9	150	1000	10– 27,7 <sup>4</sup>			

Примечания. <sup>1</sup> По [World Bank, 2017]. <sup>2</sup> По [IEA, 2017]. <sup>3</sup> По [Grandell et al., 2016]. <sup>4</sup> Нижний и верхний пределы диапазона отвечают периодам 2031–2050 гг. и 2021–2030 гг. соответственно.

зования систем накопления и хранения электроэнергии как стационарных (сетевого масштаба и децентрализованных), так и мобильных (для электромобилей и гибридов). Сценарий IEA 2DS потребует роста глобальной емкости аккумуляторов разных типов по мере перехода к ВИЭ с 4108 ГВт-час в 2025 г. до 22270 ГВт-час в 2050 г., причем 90% глобальной емкости СНЭ будет приходиться на мобильные аккумуляторы [World Bank, 2020; IEA, 2017]. Соответствующий темп роста (7,0% в год) в модели распространяется на весь период с 2021 по 2050 г.

Потребление металлов в СНЭ зависит от соотношения между применяемыми субтехнологоло-

тиями — типами аккумуляторов: использование кислотно-свинцовых аккумуляторов в настоящее время сокращается, а внедрение проточных окисительно-восстановительных батарей, использующих в качестве электролита раствор солей ванадия, только начинается. Поэтому в модели предусмотрено резкое доминирование Li-ионных автомобильных аккумуляторов и стационарных СНЭ. В 2020 г. на них приходилось 14,5% из 2930 ГВт-час глобальной емкости СНЭ всех типов (в том числе 5% емкости мобильных и 100% стационарных аккумуляторов). Однако в модели, начиная с 2021 г., доля Li-ионных устройств возрастает на 10% в год, и к 2031 г. они полностью вытеснят доминирующие в настоящее время свинцово-кислотные аккумуляторы.

Базовый вариант расчетов на основе модели предусматривает, что совокупная емкость применяемых в настоящее время литий-ионных аккумуляторов распределена неравными долями между литий-никель-марганец-cobальт-оксидными (60%), литий-марганец-оксидными (20%), литий-никель- cobальт-алюминий-оксидными (15%) и литий-железо-фосфатными аккумуляторами (5%) [Vaalma et al., 2018]. Данные об использовании минеральных материалов в аккумуляторах в литературе приводятся не для разных типов СНЭ, а только для нынешнего сочетания перечисленных субтехнологий (60:20:15:5). Модель по необходимости предусматривает сохранение до 2050 г. сложившегося к настоящему времени соотношения между субтехнологиями. Однако в одном из вариантов расчетов предусматривается постепенное вытеснение их требующими меньше цветных металлов Li-S аккумуляторами.

Анодным материалом в Li-ионных аккумуляторах служит графит, который потребляется в количестве 1000 т/ГВт-час емкости СНЭ. В настоящее время 45% всего применяемого для этих целей графита является природным сырьем, а остальные 55% получаются искусственно путем многоэтапной термомеханической обработки состава из антрацитового или нефтяного кокса и пека. Синтезированное сырье по ряду причин предпочтительнее, однако масштабы замещения им природного графита трудно предсказуемы. В дальнейшем предполагается, что искусственное и природное сырье в течение всего рассматриваемого периода в любом варианте расчетов будут продолжать использоваться в соотношении 55:45.

В электромобилях критические материалы используются не только в аккумуляторах, но и в моторах, силовой электронике и кабелях. По данным IEA, в 2020 г. в мире насчитывалось 12,9 млн электромобилей. Согласно сценарию IEA 2DS, их численность возрастет до 150 млн к 2030 г. (рост в среднем на 27,7% в год в 2021–2030 гг.) и почти до 1000 млн к 2050 г. (рост на 10% в год в 2031–2050 гг.). Дополнительное количество металлов, используемых в электромобилях, зависит от мощности их двигателей. В электронной модели принято, что

Таблица 2

## Потребление металлов в альтернативной энергетике и смежных областях

Солнечная электрогенерация <sup>1</sup> (т / ГВт)														
Технологии / субтехнологии	Al	Cu	Ag	Ga	Ge	In	Se	Cd	Te	Pb	Zn	Mo	Sn	Сталь
Солнечные панели: c-Si	7500	4600	20 (4) <sup>2</sup>		41 (13)	5,3				72,4			124,1	67900
a-Si	7500	4600		9 (2)		28 (7)	41 (17)	0,9	4,7		30,0		103,1	67900
CIGS	7500	4600		*		8		70 (19)	60 (17)	*	*		5,95	67900
CdTe	7500	4600											83,9	67900
Системы концентрирующего типа <sup>4</sup>														
параболические	*													*
желоба	*			3,8										*
отражатели Френеля	*			13,8										
Ветровая электрогенерация <sup>1</sup> (т / ГВт)														
	Al	Cu	Cr	Ni	Mn	Dy	Pr	Nd	Tb	B	Zn	Mo	Чугун	Сталь
Средне-высокоскоростные турбины с редуктором	1500	1400	470	440	780	2	0	12	1	1	5500	99	18000	113000
Низкоскоростные турбины прямого привода	500	3000	525	240	780	27	35	180	7	6	5500	109	20100	119500
Накопление и хранение электроэнергии <sup>4</sup> (т / ГВт-час)							Электромобили и гибриды <sup>5</sup> (т / млн ед.)							
	Al	Cu	Li	Co	Ni	Mn	Dy	Pr	Nd	Tb	Ga	In	Ge	Ag
Стационарные и автомобильные Li-ионные аккумуляторы <sup>6</sup> , моторы и силовая электроника электромобилей и гибриды	220	220	113 (411)	124 (0)	415(0)	406(0)	150	85	255	15	0,76	0,04	0,04	5

Примечания. <sup>1</sup> По [Moss et al., 2011; Ohrlund, 2012; Nassar et al., 2016; World Bank, 2017; Dominish et al., 2019; et al., Carrara et al., 2020].

<sup>2</sup> В скобках указывается ожидаемое потребление материалов в 2050 г. <sup>3</sup> Опубликованные данные отсутствуют. <sup>4</sup> По [Dominish et al., 2019]. <sup>5</sup> По [Grandell et al., 2016]. <sup>6</sup> В скобках указывается потребление материалов в новой субтехнологии (литий-серных аккумуляторах).

в рассматриваемый период суммарные емкости аккумуляторов электромобилей малой (< 50 кВт) и повышенной (> 50 кВт) мощности, различающихся по металлоемкости [Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019], будут находиться в соотношении 50:50.

Срок службы электромобилей и устройств для генерации, накопления и хранения энергии является одним из важнейших факторов, определяющих потребление металлов в этих областях — его увеличение может привести к снижению металлоемкости альтернативной энергетики. Однако в дальнейшем предполагается, что в обозначенный период сроки службы оборудования останутся неизменными и составят для солнечных концентраторов и фотовольтаики 30 лет, ветровых установок — 20, электромобилей — 15, а для устройств накопления и хранения энергии, в том числе автомобильных аккумуляторов — 10 лет [World Bank, 2020].

Удельное потребление материалов в расчете на 1 ГВт установленной мощности электрогенерации или 1 ГВт-час емкости СНЭ, а также на один электромобиль в базовом варианте расчетов на основе электронной модели в 2021–2050 гг. принимается

постоянным. При этом используются усредненные значения металлоемкости, рассчитанные по опубликованным данным (табл. 2) [Moss et al., 2011; Ohrlund, 2011; Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019; Carrara et al., 2020]. Полученные оценки массы используемых материалов являются достаточно консервативными, а в конечном счете несколько завышенными, поскольку общая тенденция к снижению металлоемкости продукции должна затронуть и малоуглеродную энергетику. При строительстве ветровых парков в наибольших масштабах потребляются также обычные и относительно дешевые неметаллические материалы (тыс. т / ГВт): цемент (363,3), стеклоуглеродные композиты, синтетические материалы (4,6); при строительстве электростанций на солнечных панелях кроме цемента (60,7) и синтетического материала (8,6) применяется также стекло (46,4).

Использование ценных вторичных металлов по истечении сроков службы техники позволяет за счет сбора и переработки образующегося лома снизить потребность в первичном минеральном сырье, и таким образом, уменьшить нагрузку на недра. Од-

Таблица 3

Доля металлов, извлекаемая для повторного использования при переработке лома в конце срока службы оборудования (%), по [Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019]

Солнечные панели и системы концентрирующего типа	Все технологии							CIGS			CdTe		c-Si
	Al	Cu	Ag	Zn	Mo	Sn	Сталь, чугун	Ga	In	Se	Cd	Te	Pb
в настоящее время	77	34	45	14	30	73	48	0	0	0	77	77	94
к 2030 г.	81	81	81	14	30	73	48	81	81	81	81	81	94
Ветровые установки	Al	Cu	Dy	Pr	Nd	Tb	Mo	Mn	Cr	Ni	Zn		
в настоящее время	80	95	0	0	0	0	30	49	81	42	17		
к 2030 г.	95	95	95	70	80	50	30	49	81	95	95		
Аккумуляторы всех типов	Al	Cu	Li	Co	Ni	Mn							
в настоящее время	70	70	0	60	90	0							
к 2030 г.	95	95	60	95	95	95							
Электромобили	Dy	Pr	Nd	Tb	Ga	Ge	In	Ag					
в настоящее время	0	0	0	0	0	0	0	0					
к 2030 г.	95	70	80	50	81	0	81	81					

нако в настоящее время из отходов их производства в очень ограниченных масштабах извлекаются лишь некоторые важнейшие металлы, например, Ga, Te, Cd. Предполагается, что рентабельные технологии извлечения металлов из лома отслужившего свой срок оборудования могут появиться к 2030 г. Однако в базовом варианте расчетов считалось, что в 2021–2050 гг. сохранятся неизменными текущие показатели извлечения из лома важнейших для альтернативной энергетики металлов (Al, Cu, Ag, Ga, Ge, In, Se, Te, Cd, РЭ, Li, Co, Ni, Mn). Соответствующие данные, рассчитанные как произведение доли собираемого для переработки лома, на коэффициент извлечения некоторого металла при переработке этого лома, были собраны из публикаций (в частности, Grandell et al., 2016; Dominish et al., 2019) и приведены в табл. 3. При отсутствии аналогичных данных для некоторых других металлов (Mo, Zn, Fe, Pb, Sn, Cr, Ge) использованы усредненные сведения о доле этих металлов, извлекаемой из лома и используемой повторно в экономике в целом [Sibley, 2011].

*Достаточность первичных ресурсов.* Самый распространенный подход к оценке обеспеченности первичными минеральными материалами, применяемый в большинстве исследований по критическим металлам (в частности, [Speirs et al., 2015]), заключается в сравнении ожидаемой потребности в них с их глобальными запасами, извлекаемыми из недр при добыче, и глобальными ресурсами по данным на 2020 г. (например, по материалам Геологической службы США — USGS [Mineral, 2022]). Поскольку под запасами понимается часть ресурсов полезных ископаемых, отработка которой в настоящий момент экономически оправдана, оценки запасов могут меняться со временем по мере развития технологий, колебаний спроса и цен, а также под влиянием социальных и политических факторов.

Однако такой подход не учитывает, что не все 100% металла в запасах могут быть извлечены из до-

бытых руд при обогащении и из концентратов при металлургическом переделе. В результате масштабы дополнительного истощения недр при переходе к «зеленой» энергетике оказываются сильно недооцененными. Поэтому в дальнейшем полученные на основе модели результаты расчетов суммарного потребления минеральных материалов в технологиях альтернативной энергетики и глобальное (во всех отраслях) использование их в 2021–2050 гг. сравнивались с частью имевшихся в 2020 г. извлекаемых из недр запасов полезных ископаемых, которая может быть извлечена в товарную продукцию металлургического производства при нынешнем состоянии горных, обогатительных и металлургических технологий. С этой целью использовался усредненный коэффициент извлечения ( $R$ ), получаемый как произведение извлечения металла в товарную продукцию при обогащении и извлечения металла из концентратов в товарную продукцию при металлургическом переделе. Вслед за [Zhang et al., 2021] для всех 24 видов полезных ископаемых, учтенных в исследовании, первый показатель принимается равным 0,90.

Для графита в связи с отсутствием металлургического передела использовалась поправка  $R=0,9$ . Для 17 металлов на основе данных USGS по рудничному и металлургическому производству первичных металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Co и др.) в 2014–2019 гг. установлено, что извлечение металлов из концентратов изменяется от 87,5% для Co до 98,7% для Zn, а среднее значение составляет около 94%. Таким образом, извлекаемая в конечную продукцию часть запасов рассчитывалась умножением промышленных извлекаемых при добыче запасов (по данным на 2020 г.) на коэффициент  $R = 0,846$ . Для 6 металлов, извлекаемых попутно из руд Zn, Cu и бокситов, соответствующие коэффициенты рассчитывались с учетом извлечения их в товарную продукцию металлургического производства, которое состав-

ляло (%) для Cd — 42, Ge — 1,1, In — 59, Se — 25,6, Te — 8,4, Ga — 1,6.

Глобальное потребление минеральных материалов в 2021–2050 гг. определялось сложением потребления некоторого вида сырья в «зеленой» энергетике и в остальных отраслях экономики. Первое слагаемое рассчитывалось на основе электронной модели. При этом учитывалось, что спрос на графит на 55% будет удовлетворяться за счет искусственного материала, а 30% необходимого Ge будет извлекаться как и в настоящее время из золы и зольных уносов от сжигания углей.

Потребление минерального сырья в остальных отраслях рассчитывалось методом экстраполяции по данным о рудничной добыче металлов и индустриальных минералов до начала широкомасштабного строительства солнечных электростанций и ветровых парков. Так, потребление Ni возрастало (% в год) на 2,1, Co — 2,6, Te — 5,7, Ga — 3,6, Ag — 2,3 и т.д. При этом средний темп роста их потребления в 2005–2015 гг. распространялся на весь период с 2021 до 2050 г.

#### Результаты моделирования и их обсуждение.

На основе составленной электронной модели были выполнены несколько вариантов расчетов, учитывающих перечисленные основные предположения. В качестве базового принят вариант, предусматривавший сохранение нынешних технологий, их металлоемкости, а также уровня использования вторичных металлов, достигнутых в 2020 г. Во втором варианте расчетов учитывалось постепенное повышение уровня использования вторичных металлов с 2030 г. (табл. 3), в третьем — снижение материлоемкости технологий, а в четвертом — возможный переход к использованию новых технологий (табл. 2).

Исследование модели показало, что распространение чистых энергетических технологий для достижения целей Парижского соглашения приведет к значительному повышению материлоемкости электрогенерации и электромобильного транспорта будущего, а значит, и мировой экономики в целом по сравнению с электроэнергетикой, основанной на ископаемом топливе, и транспортом с двигателями внутреннего сгорания.

Для реализации сценария IEA 2DS в 2021–2050 гг. требуется дополнительно израсходовать около 1963,1 млн т суммарно первичного и вторичного минерального сырья, а также искусственно получаемых материалов. Незначительную часть из них составляют (%) стеклоуглеродные композиты (1,0) и продукты органического синтеза (1,9), например, этиленвинилацетат (герметик). Для получения почти всех остальных материалов необходимо расширенное использование твердых полезных ископаемых, извлекаемых из недр Земли.

В количественном отношении среди материалов для «зеленой» энергетики резко доминируют цемент (1039 млн т, или 52,9%), сталь и чугун (581 млн т,

или 29,6%) и стекло (143 млн т, 7,2%). Однако для реализации сценария IEA 2DS в 2021–2050 гг. потребуется от 15 до 70 млн т цемента в год, т.е. от 0,4 до 1,7% его производства в 2020 г. За весь 30-летний период на нужды новых энергетических технологий будет израсходовано лишь 4% чугуна и менее 30% стали, произведенной только в 2020 г. При этом дополнительно потребуется извлечь из недр всего 1% огромных мировых запасов железа, представленных, в основном, очень крупными месторождениями железистых кварцитов. Остальные 5,8% массы материалов (113,3 млн т) приходятся на долю 22 черных (кроме Fe), цветных, редких и благородных металлов, различающихся по масштабам применения и роли в энергетическом переходе (рис. 2). На 90,7% это первичные металлы, извлекаемые из руд, и именно их запасы и добыча из недр (рудничная добыча) будут анализироваться в дальнейшем (табл. 4).

На основе составленной электронной модели определялись потребности во всех перечисленных выше видах минерального сырья. Многие из них, в том числе Cu, Al, Cr, Mo, Mn, Sn будут востребованы в низкоуглеродных энергетических техно-

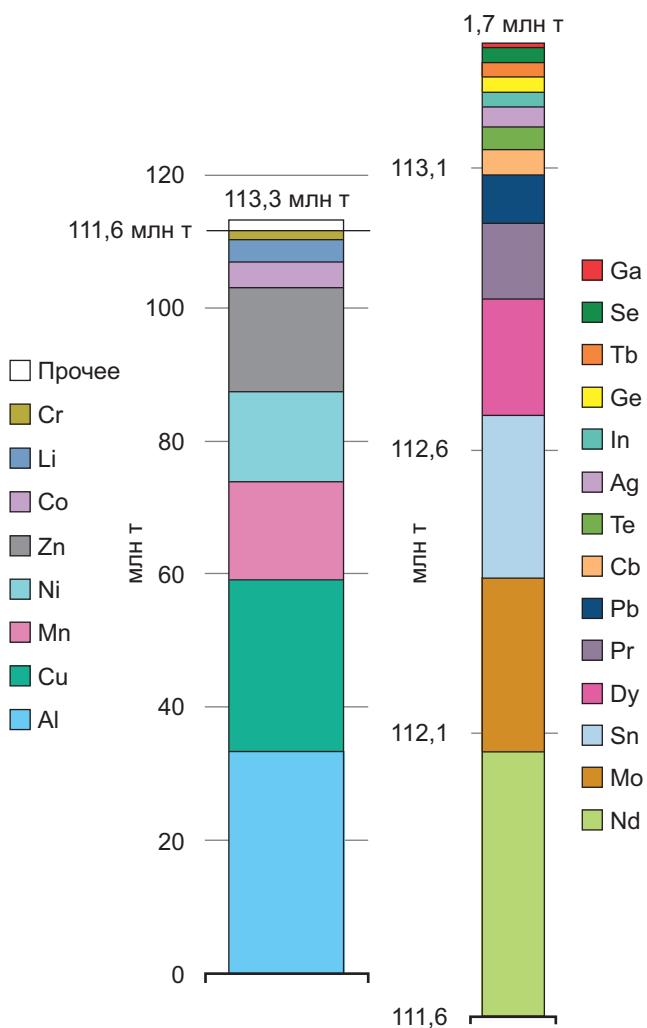


Рис. 2. Использование черных (кроме железа в стали и чугуне), цветных, редких и благородных металлов (суммарно первичных и вторичных) при реализации сценария IEA 2DS в 2021–2050 гг.

Таблица 4

**Дополнительное потребление первичных минеральных материалов в связи с энергетическим переходом по сценарию IEA 2DS в 2021–2050 гг.**

Металл / минерал	Мировые запасы <sup>1</sup>	Мировая рудничная добыча <sup>2</sup> (2020)	Потребление первичного минерального сырья			
			2050		2021–2050	
	тыс. т	тыс. т	тыс. т	доля рудничной добычи в 2020 г. (%)	тыс. т	доля мировых извлекаемых запасов в 2020 г. (%)
Fe	85000000	1522559	43429	3	552543	0,8
Al	5984000	65352	2827	5	31058	0,6
Cu	880000	20788	2044	10	23463	3,2
Zn	250000	12608	1049	9	14969	7,1
Mn	1500000	19277	1190	7	14426	1,1
Графит	320000	940,5	1158	123	13755	4,8
Ni	95000	2492	718	31	9501	11,8
Li	22000	87	291	357	3454	18,6
Co	7600	129	236	194	2955	46,0
Cr	570000	8186	75	1	1178	0,2
Nd	8000	20	40	215	466	6,9
Mo	16000	284	23	9	293	2,2
Sn	4900	277	25	10	290	7,0
Dy	480	2	19	1243	206	50,7
Pr	2000	6	12	222	131	7,8
Pb	90000	4746	5	0,1	88	0,1
Cd	1250	25	6	22	44	9,3
Te	31	0,4	5	1143	40	241,0
Ag	530	26	3	11	36	8,1
In	25	0,9	3	344	26	145
Ge	125	0,1	2	2348	18	1439,6
Se	100	3	3	96	25	20,0
Tb	300	0,32	2	739	25	10,0
Ga	1600	0,3	1	260	7	25,5

*Примечания.* <sup>1</sup> По [Mineral ..., 2022]. <sup>2</sup> Для Se, Te, Cd, In, Ga, Ge учитывается металлургическое производство первичного металла (по [Mineral..., 2022]).

логиях и электромобилях в больших количествах. Суммарное дополнительное потребление, связанное с энергетическим переходом, за 30-летний период достигает максимума для Al (31 млн т), а для других первичных цветных металлов составляет 23,5 млн т Cu (120% рудничной добычи металла в 2020 г.), 15 млн т Zn (124%), 290 тыс. т Sn (111%) и т.д. Намного большее дополнительное потребление, выраженное в долях рудничной добычи в 2020 г., демонстрируют, например, Ni (9,5 млн т, 406%), графит (13,8 млн т, 1463%), Co (3,0 млн т, 2437%), Li (3454 тыс. т, 4237%), а также РЗЭ, входящие в состав магнитных сплавов в ветровых электрогенераторах и моторах электромобилей, в частности, Pr (131 тыс. т, 2362%), Nd (466 тыс. т, 2479%), Tb (25 тыс. т, 8311%) и Dy (206 тыс. т, 13697%). Высоким предполагается также дополнительный спрос на металлы для полупроводниковых материалов в солнечных панелях (в долях металлургического производства металлов в 2020 г.): Cd (44 тыс. т, 187%), Se (3,3 тыс. т, 750%), Ga

(6,5 тыс. т, 1469%), In (25,6 тыс. т, 2712%), Te (40 тыс. т, 9009%) и Ge (17,8 тыс. т, 17810%). Эти и некоторые другие виды минерального сырья имеют наибольшее значение для технологий энергетического перехода. Успех реализации сценария IEA 2DS при оговоренных основных предположениях будет зависеть от возможности удовлетворить спрос на них.

**Обеспеченность технологий энергетического перехода запасами критического сырья.** Расчеты показали, что суммарная дополнительная рудничная добыча некоторых критических металлов в 2021–2050 гг. только для нужд технологий энергетического перехода сопоставима (например, для Co и Ga) с их добычей за всю историю промышленного использования этих металлов, а для Ge, Te, In существенно превышает ее (в 3,6 раза для Ge и Te, в 1,6 раза для In).

Планирование колоссального по своим масштабам и значимости перехода к низкоуглеродной энергетике требует обсуждения вопроса об обеспеченности его запасами критически важных видов

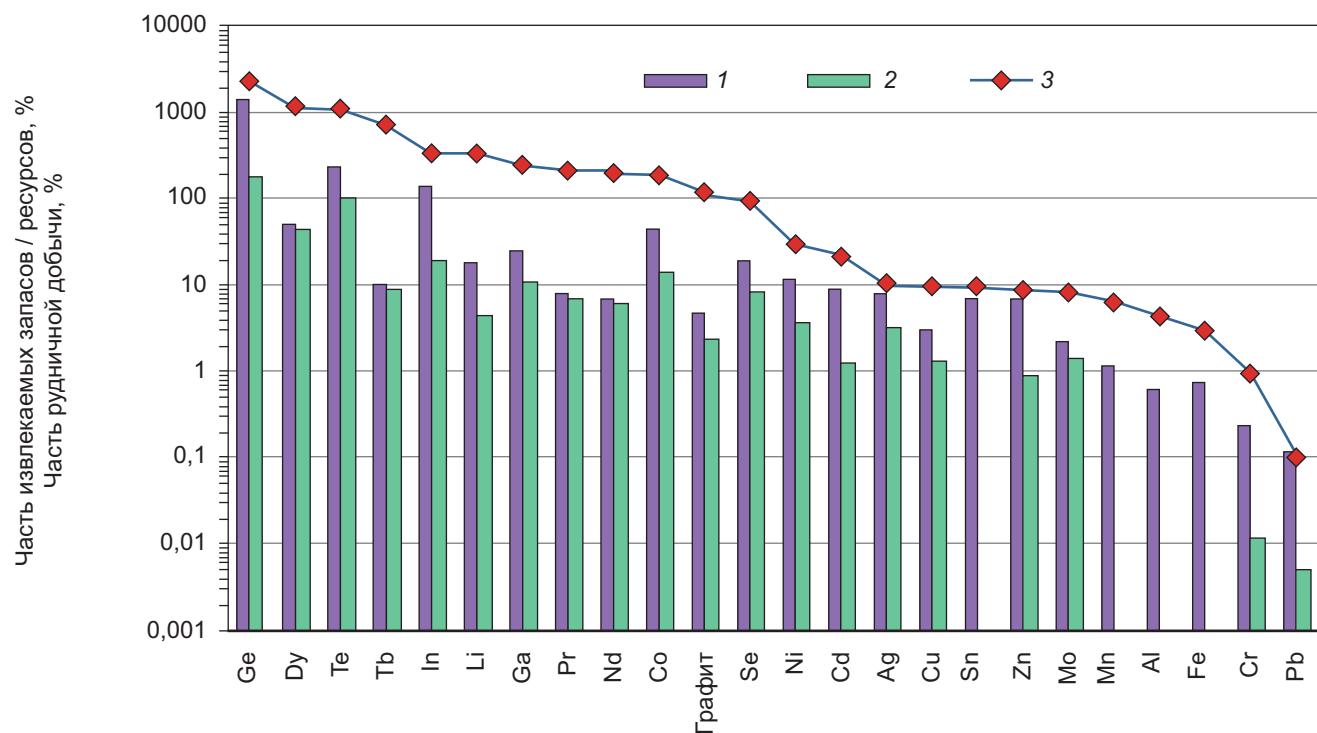


Рис. 3. Потребление первичных металлов и натурального графита в технологиях энергетического перехода: 1–2 — в 2021–2050 гг. в долях (%) мировых извлекаемых запасов (1) и ресурсов (2) (по данным на 2020 г.); 3 — в 2050 г. в долях (%) их глобальной рудничной добычи в 2020 г.

сырья. Сравнение их потребления с имеющимися запасами и ресурсами позволяет предполагать появление в будущем проблем с поставками критических минеральных материалов и выбирать оптимальные технологии.

В базовом варианте расчетов за 30 лет суммарный спрос в технологиях энергетического перехода на целый ряд первичных критических металлов (с учетом их сквозного извлечения в конечную продукцию металлургического производства) и индустриальных минералов, по крайней мере теоретически, может быть удовлетворен за счет существенной части имевшихся в 2020 г. запасов. Эта часть сравнительно мала (%) для графита (5), Nd (7), Pr (8), Ag (8), Cd (9), Tb (10), Ni (12), но она намного больше для Li (19), Se (20), Ga (26), Co (46), Dy (51) (рис. 3). Наименее благополучно складывается ситуация с обеспечением растущего спроса запасами In, Te и Ge. С учетом сквозного извлечения этих металлов в металлургическую продукцию при современных технологиях для удовлетворения спроса на них в 2021–2050 гг. суммарно потребуется соответственно 145, 241 и 1440% известных в 2020 г. извлекаемых запасов. Иными словами, даже если бы эти металлы использовались исключительно в технологиях энергетического перехода в рамках сценария IEA 2DS при основных предположениях базового варианта расчетов, известные запасы In теоретически могли бы быть полностью истощены уже в 2048 г., Te — в 2043 г., а Ge — в 2031 г.

Однако более реалистичным является вариант расчетов, в котором ускоренный рост потребления критических металлов в «зеленых технологиях»

будет происходить на фоне возрастания использования их и в остальных секторах экономики темпами, достигнутыми в первом десятилетии XXI в. (до начала массового строительства солнечных электростанций и ветровых парков). Для обеспечения мировой экономики некоторыми видами минерального сырья даже без учета потребностей альтернативной энергетики к 2050 г. должны быть выявлены, разведаны и полностью отработаны запасы, многократно превышающие известные в настоящее время (рис. 4). Потребуются, например, 212% нынешних запасов Te, 389 и 551% запасов In и Ge соответственно.

Энергетический переход еще более усугубил бы ситуацию с обеспечением запасами некоторых критических видов сырья. В этом случае удовлетворение глобального спроса потребовало бы с учетом коэффициента сквозного извлечения отработать к 2050 г. (доля запасов по состоянию на 2020 г., %) 1991 запасов Ge, 534 In, 453 Te, 262 Ag, 226 РЗЭ, 146 Se, 141 Ni, 138 Co, 113 Cu, 90 Ga, 52 Li, 20 графита. При этом мировые запасы Ge, Ag, In, Zn, Sn, Pb, Te были бы полностью исчерпаны уже в 2026–2036 гг., запасы Cd, РЗЭ, Ni, Se, Cu — в 2038–2044 гг., а Cr, Co, Mo, Mn — в 2045–2049 гг.

При таком положении дел уже к середине 2030-х годов может оказаться, что цели сценария IEA 2DS не могут быть достигнуты даже при вполне реалистичных основных предположениях базового варианта расчетов. Это поставило бы мир перед выбором между энергетической безопасностью и климатическими обязательствами. Кроме того, рост спроса со стороны «зеленых» технологий и усиление конкуренции за критические минеральные материалы могли бы

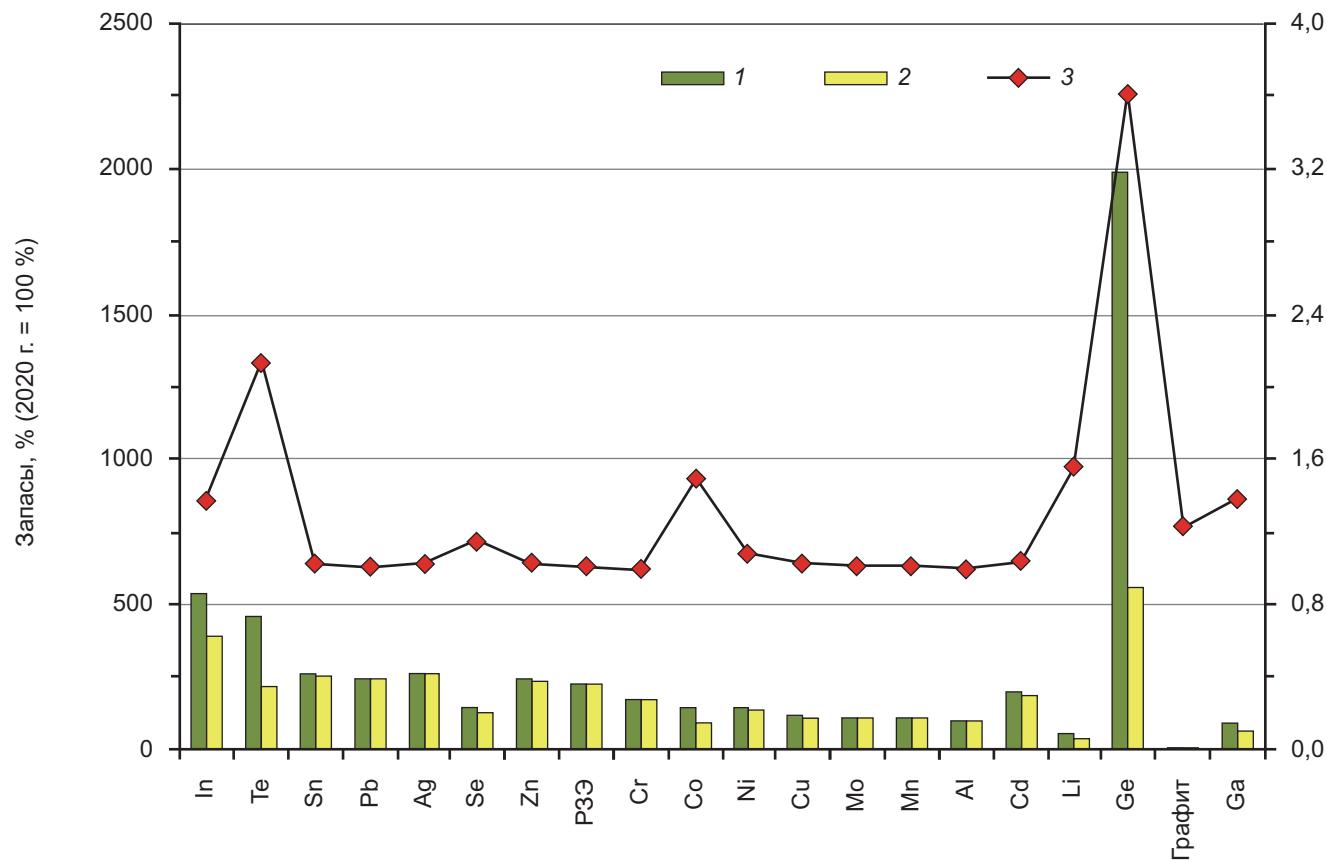


Рис. 4. Запасы минерального сырья, необходимые для удовлетворения потребностей мировой экономики с учетом (1) и без учета технологий энергетического перехода (2) и их соотношение (3) (шкала справа)

привести к повышению цен на них и, в конечном счете, к масштабной «зеленой» инфляции.

Острота вопроса об обеспечении технологий энергетического перехода запасами минерального сырья может быть снижена за счет реализации комплекса мер. Это, в частности, извлечение критических металлов из месторождений новых типов (например, получение Te из руд золото-теллуридных месторождений), повышение коэффициентов извлечения металлов (актуально, например, для Cd, In, Ge, Se, Te, Ga). Среди наиболее действенных мер следует рассматривать также снижение материоемкости технологий, развитие минерально-сырьевой базы критических минеральных материалов и снижение нагрузки на невозобновляемые ресурсы за счет получения искусственного сырья, а также извлечения вторичных металлов из лома и отходов.

*Ускорение темпов геологоразведочных работ.* Совершенно ясно, что энергетический переход невозможен без разведки новых запасов целого ряда видов минерального сырья, кратно превышающих имевшиеся в 2020 г. Промышленные запасы полезных ископаемых могут быть пополнены за счет гранично-экономических запасов и непромышленных ресурсов, которые наряду с промышленными запасами, по классификации USGS, относятся к выявленным ресурсам. Они, по данным этого агентства, зачастую в несколько раз превышают разведанные

на сегодня промышленные запасы (например, в 6,3 раза для Ga, 3,3 раза для Co, 2,5 раза для графита, 2,4 раза для Li, 1,4 раза для РЗЭ).

Оценка возможностей наращивания запасов за счет открытия новых месторождений критических минералов и металлов требует углубленного металлогенического анализа и не входит в задачу нашего исследования. Однако ясно, что возможность совершить энергетический переход, по крайней мере, по выбранному сценарию будет не в последнюю очередь определяться успехом поисково-разведочных работ на критические для «зеленой» энергетики виды полезных ископаемых.

Концепция устойчивого развития предполагает по крайней мере поддержание на постоянном уровне обеспеченности мировой экономики запасами важнейших видов сырья. Нынешние промышленные запасы Co (7600 тыс. т), например, при достигнутых в 2020 г. масштабах рудничного производства (129 тыс. т), с учетом коэффициента извлечения металла при обогащении 0,9 достаточны для обеспечения металлом мировой экономики в течение 53 лет.

В 2010–2020 гг. запасы Со возросли с 7300 до 7600 тыс. т, а суммарное рудничное производство металла составило 1260 тыс. т, что потребовало отработки запасов 1400 тыс. т металла. Таким образом, за 11 лет были разведаны запасы 1700 тыс. т,

или в среднем 154,5 тыс. т Со в год (2,0% запасов металла в 2020 г.).

Для сравнения, с учетом среднего темпа роста добычи Со в начале века (2,6% в год) в 2050 г. глобальное потребление первичного металла без учета технологий, использующих ВИЭ, по расчетам достигло бы 278 тыс. т. К этому моменту с учетом сквозного извлечения металла ( $R = 0,846$ ) были бы отработаны запасы 6968 тыс. т Со, или 92% запасов металла, имевшихся в 2020 г. Остаток запасов, необходимый для поддержания прежней обеспеченности экономики запасами при достигнутом в 2050 г. уровне добычи, должен был бы составить около 17416 тыс. т. Таким образом, за 30 лет необходимо было бы разведать запасы 16784 тыс. т Со, что в 2,2 раза больше нынешних. Это означает, что ежегодно должно было бы разведываться в среднем 559,5 тыс. т Со (7,4% запасов в 2020 г.).

С учетом же потребностей новых энергетических технологий в 2050 г. глобальное потребление первичного металла, по расчетам, достигнет 514 тыс. т. К этому моменту должны быть отработаны запасы 10461 тыс. т Со (с учетом коэффициента сквозного извлечения), или 138% запасов металла в 2020 г., а остаток запасов, необходимый для поддержания прежней обеспеченности экономики при достигнутом уровне добычи, должен составить около 32201 тыс. т. Таким образом, за 30 лет должны быть разведаны запасы 37 586 тыс. т Со, что не только в 4,6 раза больше имевшихся в 2020 г., но и превышает в 1,4 раза нынешние ресурсы этого металла (25 000 тыс. т). Это означает, что в течение 30 лет в среднем ежегодно должны разведываться запасы 1169 тыс. т Со, т.е. 15,4% запасов металла в 2020 г. Аналогичная ситуация складывается и с запасами большинства других критических минеральных материалов. Такие темпы наращивания запасов в течение столь длительного времени беспрецедентны и мало реальны.

Предсказать, какая доля выявленных ресурсов в рассматриваемые сроки может реально превратиться в запасы по результатам разведки, не представляется возможным, однако ясно, что кумулятивное глобальное потребление с учетом коэффициента сквозного извлечения составило бы существенную часть ресурсов In, Co, Se (42–70%), и даже превысило бы нынешние мировые ресурсы Ag (в 1,1 раза), Te (в 1,9 раза) и Ge (в 2,6 раза).

*Извлечение металлов из лома и отходов, получение искусственного сырья.* Исследованиями модели установлено, что в базовом варианте расчетов в 2021–2050 гг. вторичное сырье составит заметную часть суммарного потребления (%) лишь для Mo (4,4), Fe (4,7), Al (6,6), Cu (9,6), Cr (12,9), и только двух критически важных металлов: Со (22,0) и Ni (31,0) (рис. 5). Кроме того, искусственное сырье на 55% удовлетворит потребность в графите, а 30% Ge будет получаться из золы и зольных уносов, образующихся на угольных электростанциях. Благодаря

этому будет сохранена в недрах существенная доля (%) нынешних мировых запасов Ge (608), Со (13), графита (5,8) и Ni (5,3) (с учетом коэффициента  $R$ ).

Значение вторичного сырья возрастет, если к 2030 г. появятся рентабельные и эффективные технологии его переработки и извлечение металлов повысится (табл. 3). Важнейшим результатом при этом станет увеличение в суммарном потреблении доли (%) вторичных Mn (с 1,2 до 30,8), Zn (с 2,7 до 15,2), и что особенно важно, дорогостоящих Ni (до с 31,0 до 33,4) и Со (с 22,0 до 34,9). Кроме того, произойдет также частичное замещение первичного сырья вторичными Li (22), Dy (17,3), Pr (13,0), Nd (14,7), Tb (11,8). Это позволит уменьшить нагрузку на невозобновляемые природные ресурсы, сохранив в недрах за 30 лет (доля запасов, имевшихся в 2020 г., %) 20,6 Со и 5,7 Ni (вместо 13,0 и 5,3 соответственно в базовом варианте расчетов), 6,4 Dy, 4,1 Li, а также незначительную часть запасов других РЭ и Zn (по 1–2%) (с учетом коэффициентов сквозного извлечения металлов).

Однако и при внедрении перспективных технологий извлечения вторичных металлов не снижается острота проблемы низкой обеспеченности нынешними запасами Ge, In, Te, Ag, Cd, Co, Ni, Se, РЭ. И в целом влияние вторичных металлов на потребление невозобновляемых ресурсов в процессе энергетического перехода, которое подчеркивалось в более ранних аналогичных исследованиях (например, [World Bank, 2020]), в первые 30 лет оказывается очень слабым. Это объясняется не только низкими в настоящее время показателями извлечения большинства важнейших металлов из образующегося лома, но и быстрыми темпами роста большинства предусмотренных сценарием технологий энергетического перехода, а также длительными сроками полного износа оборудования в большинстве из них.

*Снижение материоемкости технологий.* В базовом варианте расчетов удельное потребление материалов принималось неизменным на протяжении всех 30 лет реализации сценария IEA 2DS. Однако опыт последних полутора десятилетий показывает, что в 2021–2050 гг. можно ожидать значительного сокращения металлоемкости ветровых электрогенераторов и солнечных панелей разных типов.

В первом случае для учета этой тенденции вслед за [Carrara et al., 2020], предполагалось сокращение расхода Dy, Nd, Pr и Tb на 1 ГВт установленной мощности электрогенерации на 2% в год, или в 1,8 раза к 2050 г. Во втором случае учитывалось возможное линейное снижение потребления Ag, Ga, Ge, In, Se, Cd и Te в субтехнологиях фотовольтаики в 2,5–4 раза к 2050 г. до уровней, приведенных в табл. 2 (цифры в скобках).

Расчеты показали, что по сравнению с базовым вариантом расчетов постепенное снижение материоемкости технологий с учетом коэффициента сквозного извлечения металлов позволит сохранить в недрах (доля запасов по состоянию на 2020 г., %)

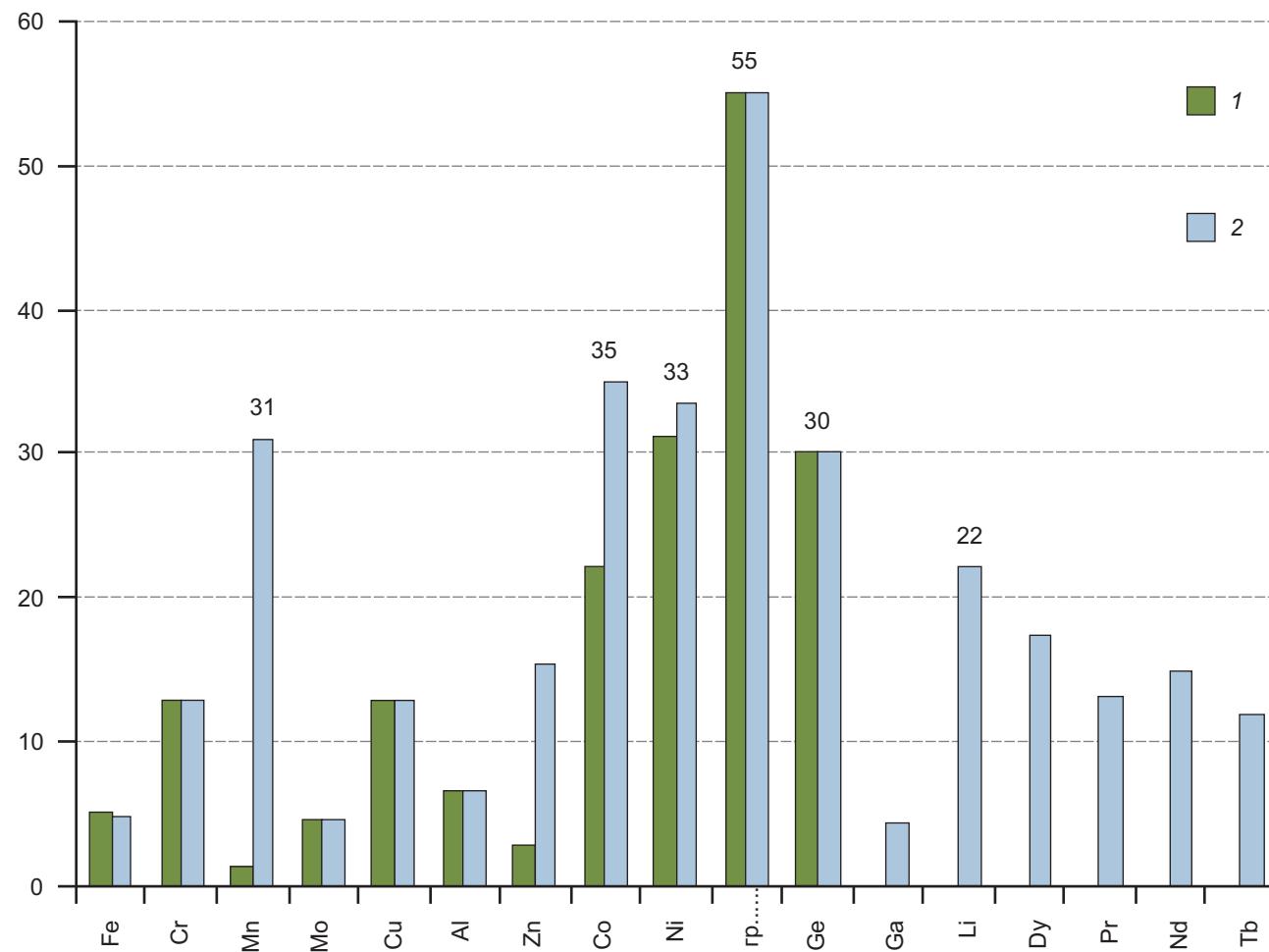


Рис. 5. Доля (%) металлов из лома и отходов и синтетического графита в суммарном потреблении в технологиях энергетического перехода в 2021–2050 гг. при реализации сценария 2DS в базовом варианте расчетов (1) и с учетом повышения извлечения вторичных металлов из лома к 2030 г. (2)

менее 1 Pr, Nd, и Tb, примерно 2 Dy, 3Ag, 5 Cd, 9 Se, 13 Ga, 58 In, 126 Te и 800 Ge. Однако и в этом случае для обеспечения только потребностей технологий энергетического перехода потребовалось бы 670% нынешних запасов Ge, 115% Te, 87% In (с учетом коэффициента сквозного извлечения металлов).

Если же принять во внимание рост глобального спроса на металлы к 2050 г. в этом варианте расчетов должны быть отработаны (доля запасов, по состоянию на 2020 г., %) 1208 Ge, 476 In, 326 Te, 260 Ag, 225 РЗЭ, 187 Cd, 137 Se, 77 Ga. При этом сроки исчерпания известных в 2020 г. мировых запасов не только критически важных Ge, Ag, In, Te, Cd, РЗЭ, Se, но всех 24 учитываемых видов минеральных материалов остались бы практически неизменными по сравнению с базовым вариантом расчетов.

*Появление новых технологий.* В базовом варианте расчета использованы существующие технологии, в том числе получающие распространение в самое последнее время. Внедрение новых технологий может заметно изменить потребность в тех или иных видах сырья. Так, на смену Li-ионным аккумуляторам могут прийти цинк-воздушные, твердотельные литиевые или новые технологии,

использующие вместо Li в 100 раз более дешевый Na, для которого практически отсутствуют ограничения по масштабам добычи и запасам. В качестве иллюстрации влияния новых технологий выполнен расчет потребления материалов в СНЭ при замене Li-ионных более экономичными, например, Li-S аккумуляторами. Предполагается, что их доля в суммарной емкости СНЭ может с 2030 по 2050 г. линейно возрастать во времени и достичь 50% к концу периода [Carrara et al., 2020]. Расчеты показали, что в результате кумулятивное потребление Li в технологиях энергетического перехода в 2021–2050 гг. возрастет с 18,6 до 29,7%, а глобальное потребление металла — с 52 до 63,1% его нынешних запасов. Постепенное сокращение использования дорогостоящих Ni и Co позволит уменьшить долю нынешних запасов этих металлов, потребляемую в технологиях энергетического перехода в 2021–2050 гг., с 46% в базовом варианте расчетов до 26,7% для Co и с 11,8 до 6,9% для Ni. Однако трудно прогнозировать появление в будущем новых рентабельных технологий и субтехнологий и их параметры, в том числе материалоемкость, и рассчитывать на них при планировании фунда-

ментальных сдвигов в развитии мировой энергетики не представляется допустимым.

**Заключение.** Важнейшая роль в развитии цивилизации, которую до сих пор играли минеральные ресурсы, сохранится за ними и в эпоху перехода к преимущественному использованию ВИЭ. Сокращение использования ископаемого топлива будет, по крайней мере, частично компенсироваться расширенным применением твердых полезных ископаемых: руд металлов и индустриальных минералов.

Планы энергетического перехода, опубликованные IEA и другими международными агентствами, составлены в парадигме бесконечности минеральных ресурсов и отсутствия ограничений на масштабы их добычи, а выбранные темпы перехода к преимущественному использованию ВИЭ не вполне обоснованы инженерными расчетами. Вопрос о достаточности существующих запасов и ресурсов критического сырья для обеспечения технологий энергетического перехода по тому или иному сценарию вообще не обсуждается с участием геологов, равно как и возможности мирового горно-металлургического комплекса добыть и переработать достаточное количество полезных ископаемых.

Кумулятивный дополнительный спрос на некоторые виды критического минерального сырья, вызванный слишком быстрым распространением низкоуглеродных энергетических технологий, только в период до 2050 г. составит существенную часть, а для Ge, In и Te многократно превысит нынешние их мировые запасы, извлекаемые в металлургическую продукцию, и даже их ресурсы. Такое соотношение между глобальным спросом на критическое минеральное сырье и его запасами и ресурсами ставит под сомнение возможность реализации даже относительно консервативного сценария IEA 2DS при

выбранных основных предположениях, соответствующих современным реалиям.

Для обеспечения технологий энергетического перехода критическими минеральными материалами в предстоящий период потребуется разработка и массовое внедрение промышленных технологий, обеспечивающих повышение сквозного извлечения металлов из руд, а также ускоренное наращивание запасов за счет интенсификации геологоразведочных работ. Расширяющееся использование вторичного и искусственного сырья, снижение материоемкости существующих и разработка ресурсосберегающих новых технологий позволят уменьшить нагрузку на природные ресурсы и снизить риск прекращения или ограничения поставок первичных критических металлов по причине их недостаточности. Однако перечисленные факторы могут рассматриваться только как вспомогательные и в целом в ближайшие 30 лет не окажут большого влияния на обеспечение технологий энергетического перехода и электромобилестроения критическим сырьем.

В предстоящий период возможность внедрения современных технологий, использующих ВИЭ, и соотношения между субтехнологиями будут зависеть от наличия достаточного количества критических материалов и цен на них. Распространение технологий энергетического перехода, и, как следствие, ускоренный рост потребления критического сырья и конкуренция за доступ к необходимым ресурсам повлекут рост мировых цен на минеральное сырье, при его удорожании возрастут затраты на производство электроэнергии, а значит, и ее стоимость ее для конечного потребителя. Таким образом, достижение целей Парижского соглашения по сценарию IEA 2DS не только приведет к повышению материоемкости электрогенерации, а значит, и мировой экономики в целом, но и ожидаемо внесет вклад в ускорение инфляционных процессов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

Парижское соглашение (Париж, 12 декабря 2015 года) // United Nations Treaty Series, No. 54113 (2016). <https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/No%20Volume/54113/Part/I-54113-0800000280458f37.pdf> (дата обращения: 01.01.2023).

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).

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](https://earthworks.org/assets/uploads/2019/04/MCEC_UTS_Report_lowres-1.pdf) (дата обращения: 14.06.2022).

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.

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).

IEA 2019. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion 2019 // Paris: IEA. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuelcombustion-2019> (дата обращения: 30.12.2022).

IRENA (International Renewable Energy Agency) 2019. Global energy transformation: A roadmap to 2050. URL: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA\\_Global\\_Energy\\_](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Apr/IRENA_Global_Energy_)

- Transformation\_2019.pdf?rev=6ea97044a1274c6c8ffe4a116ab17b8f (дата обращения: 30.12.2022).
- IRENA 2020. International renewable capacity statistics 2020. URL: [https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA\\_RE\\_Capacity\\_Statistics\\_2020.pdf?rev=1a7674fe44044cfc8788af909f28496e](https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Mar/IRENA_RE_Capacity_Statistics_2020.pdf?rev=1a7674fe44044cfc8788af909f28496e)
- IRENA 2021. International renewable capacity statistics 2021. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021> (дата обращения: 30.12.2022).
- Mineral Commodities Summaries 2022. URL: <https://doi.org/10.3133/mcs2022> (дата обращения: 09.09.2022).
- 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).
- Nassar N., Wilburn D., Goonan T. Byproduct metal requirements for U.S. wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios // Applied Energy. Vol. 183. 2016. P. 1209–1226.
- 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. 2012. 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).
- Sibley S. F. Overview of flow studies for recycling metal commodities in the United States // U.S. Geological Survey Circular 1196. 2011. P. AA1–AA25.
- Speirs J., McGlade C., Slade R. Uncertainty in the availability of natural resources: fossil fuels, critical metals and biomass // Energy Policy. 2015. Vol. 87. P. 654–664.
- Vaalma C., Buchholz D., Weil M., et al. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries // Nature Reviews Materials. 2018. Vol. 3. P.18013.
- 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).
- 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).
- Zhang Z.-X., Hou D.-F., Aladejare A., et al. World mineral loss and possibility to increase ore recovery ratio in mining production // International Journal of mining, reclamation and environment. 2021. Vol. 35. № 9. P. 670–691.

Статья поступила в редакцию 07.03.2023,  
одобрена после рецензирования 22.03.2023,  
принята к публикации 13.05.2024