



В.П.Полеванов

**XXI век: новые технологии и
полезные ископаемые**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Полеванов В.П. XXI век: новые технологии и полезные ископаемые // Проектирование будущего. Проблемы цифровой реальности: труды 7-й Международной конференции (15-17 февраля 2024 г., Москва). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2024. — С. 180-192. — <https://keldysh.ru/future/2024/4-1.pdf> <https://doi.org/10.20948/future-2024-4-1>

Размещено также [видео выступления](#)

XXI век: новые технологии и полезные ископаемые

В.П. Полеванов

ФГКУ «Росгеолэкспертиза»

Аннотация. В двадцать первом веке появились и бурно развиваются принципиально новые технологии: цифровизация с увеличением роли искусственного интеллекта, энергопереход, который вызвал необходимость в возобновляемых источниках энергии, водородная экономика; батарейная революция, электромобили. Для этого потребовалось резкое увеличение добычи таких полезных ископаемых как литий, кобальт, марганец, графит, редкоземельных металлов. Начались активные поиски принципиально нового полезного ископаемого – природного водорода.

Ключевые слова: полезные ископаемые, глобальные проекты, цифровизация, энергопереход, водород, литий

The 21st century: New technologies and minerals

V.P. Polevanov

FGKU “Rosgeolexpertisa”

Abstract. The twenty-first century saw the emergence and rapid development of fundamentally new technologies: Digitalisation with the increasing role of Artificial Intelligence, the energy transition, which necessitated renewable energy sources, the hydrogen economy; the battery revolution, electric cars. This required a dramatic increase in the extraction of minerals such as lithium, cobalt, manganese, graphite, rare earth metals. Active search for a fundamentally new mineral – natural hydrogen – began.

Keywords: digitalisation, energy transition, hydrogen, lithium

Главными экономическими процессами XXI в. являются:

- I. Переход в шестой технологический уклад
- II. Цифровизация с увеличением роли искусственного интеллекта.
- III. Энергопереход:
 - a. возобновляемые источники энергии;
 - b. водородная экономика;
 - c. батарейная революция, электромобили.

IV. Становление Китая в качестве мирового горно-геологического и экономического лидера.

Основные тенденции XXI в., требуют увеличения добычи как традиционных полезных ископаемых (Fe, Cu, Ni, Co...), так и вовлечения в гигантских количествах ранее практически не потреблявшихся **редкоземельных металлов (РЗМ), лития...** Перед человечеством встала задача не только производить водород, но и найти месторождения **природного водорода.**

Переход экономики Мира к шестому высокотехнологичному укладу с преобладанием микроэлектроники и нанотехнологий с гелио и ядерной энергетикой вызвал резкий рост добычи РЗМ.

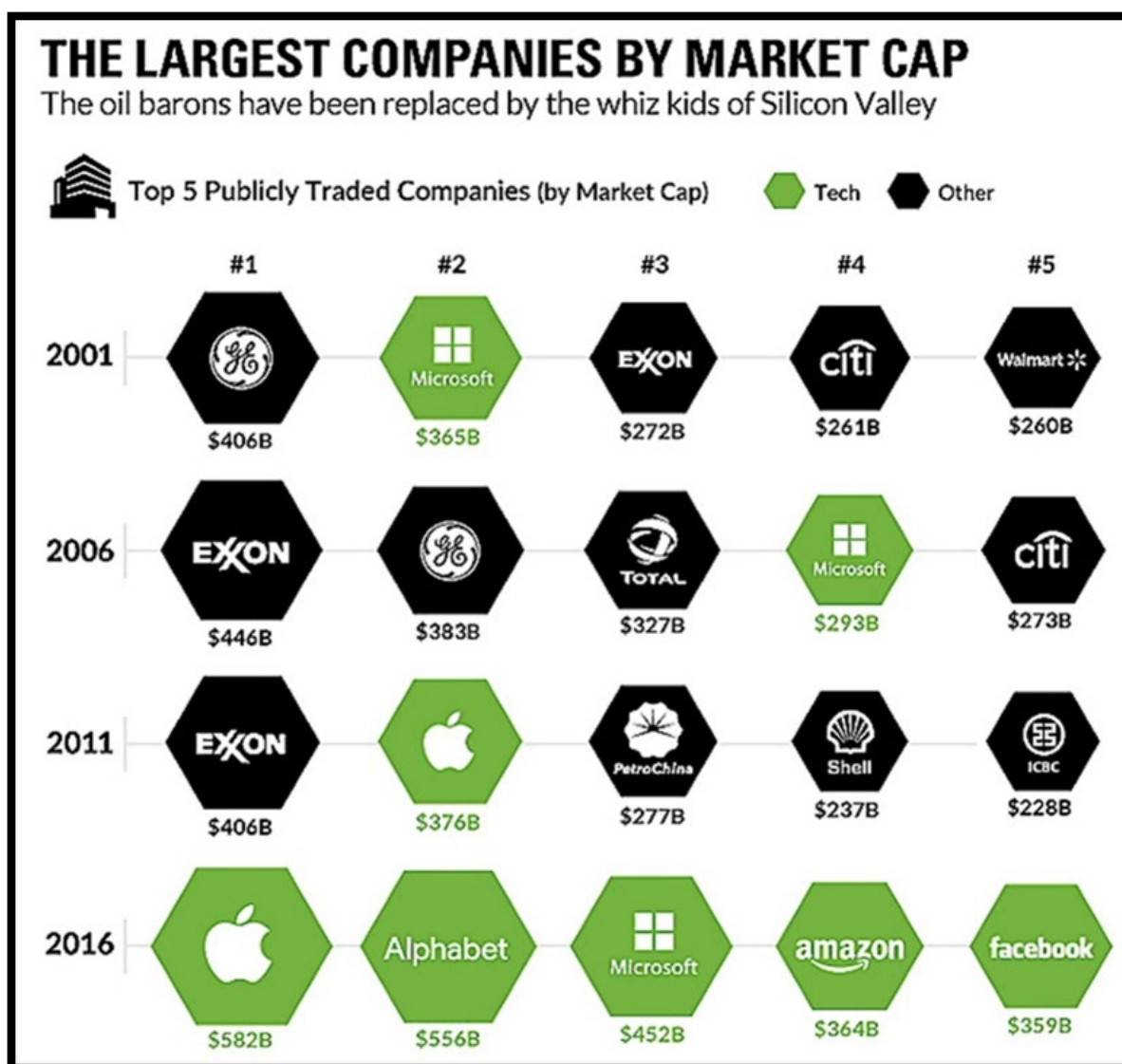


Рис. 1. 2016 г. – начало цифровой эры в мировой экономике. На первые пять мест в капитализации вышли исключительно цифровые компании, навсегда вытеснив добычные углеводородные компании

В 2016 г. на первые пять мест в Мира по биржевой капитализации впервые вышли цифровые высокотехнологичные компании, вытеснив с этих позиций (вероятно, навсегда) нецифровые, в основном, нефтяные компании. Ключевой момент в наступающей эре цифровизации МИРА! (рис. 1).

Информационные технологии привели к революционным изменениям в росте производительности, по сути уничтожив конвейерное производство, и объединили весь мир. Бесплатных продуктов информатизации – всё больше: Википедия, вайбер, торрент, ютуб... Мы входим в эпоху «цифрового социализма»! Старый капиталистический мир исчерпал ресурс развития и неизбежно должен отмереть. Сегодняшний «кризис не циклический, но усиливающийся. Он не ограничен природой вокруг нас, но включает социальный, политический, культурный, моральный кризис, кризис демократии, идеологий и капиталистической системы», указывается в юбилейном докладе Римского клуба “Come on!”.

Нынешний кризис – самый тяжёлый из всех возможных. Это кризис смены формаций!

Смена технологической парадигмы в истории человечества привела к серьезным изменениям, в которых постоянно увеличивалась роль новых полезных ископаемых как в количественном, так и в качественном отношении. Переход к шестому технологическому укладу потребовал резкого увеличения потребления редкоземельных и «батареинных» полезных ископаемых.

В основе всех изменений нового цифрового мира лежат девять основных технологий XXI в., требующих резкого роста потребления полезных ископаемых как традиционных, так и новых – литий, РЗМ и т.д.

Мной рассматриваются цепочки поставок девяти приведенных основных технологий шестого технологического уклада и сделана попытка оценить будущие проблемы и обсудить, как может развиваться конкуренция за ресурсы в трех стратегических секторах: возобновляемая энергия, электронная мобильность, оборона и аэрокосмическая промышленность:

1-3. Батареинная литий-ионная индустрия. Робототехника. Дроны.

4. Водородная энергетика – топливные элементы (ТЭ) являются важной технологией преобразования энергии, которая вместе с водородом в качестве топлива открывает высокий потенциал для декарбонизации энергетической системы и электромобильности в будущем, хотя широко-масштабное внедрение этих технологий еще не состоялось.

5-6. Ветровая и солнечная энергетика. Фотоэлектрические (PV) технологии вместе с ветроэнергетикой приведут к трансформации мирового электроэнергетического сектора; фотоэлектрические панели также актуальны для использования в космосе.

7. Электрические тяговые двигатели являются центральными компонентами электромобилей. Двигатели с постоянными магнитами, содер-

жащие редкоземельные элементы, особенно эффективны и привлекательны для современных и будущих приложений электронной мобильности.

8. **3D-печать** (3DP, аддитивное производство или AM) быстро изменит традиционные цепочки поставок и заменит традиционное производство, особенно в оборонной и авиакосмической отраслях. Это приведет к значительному изменению количества и видов потребляемого сырья и обрабатываемых материалов;

9. **Цифровые технологии** поддерживают огромный цифровой сектор, позволяя использовать все технологии. Как ни для одной другой отрасли для их развития необходимо резкое увеличение добычи редкоземельных и батарейных металлов.

На рис. 2 приведена потребность в основных металлах для этих технологий и степень обеспеченности ими мировой экономики.

Чтобы прийти к какой-либо оценке будущего спроса и конкуренции, сырье, технологии и отрасли необходимо рассматривать вместе, поскольку несколько технологий и секторов конкурируют за одни и те же материалы. Например, ветроэнергетические и тяговые двигатели конкурируют как за различные РЗМ, так и за бораты (соли ортоборной кислоты H_3BO_3); робототехника и дроны также используют РЗМ, литий, кобальт...

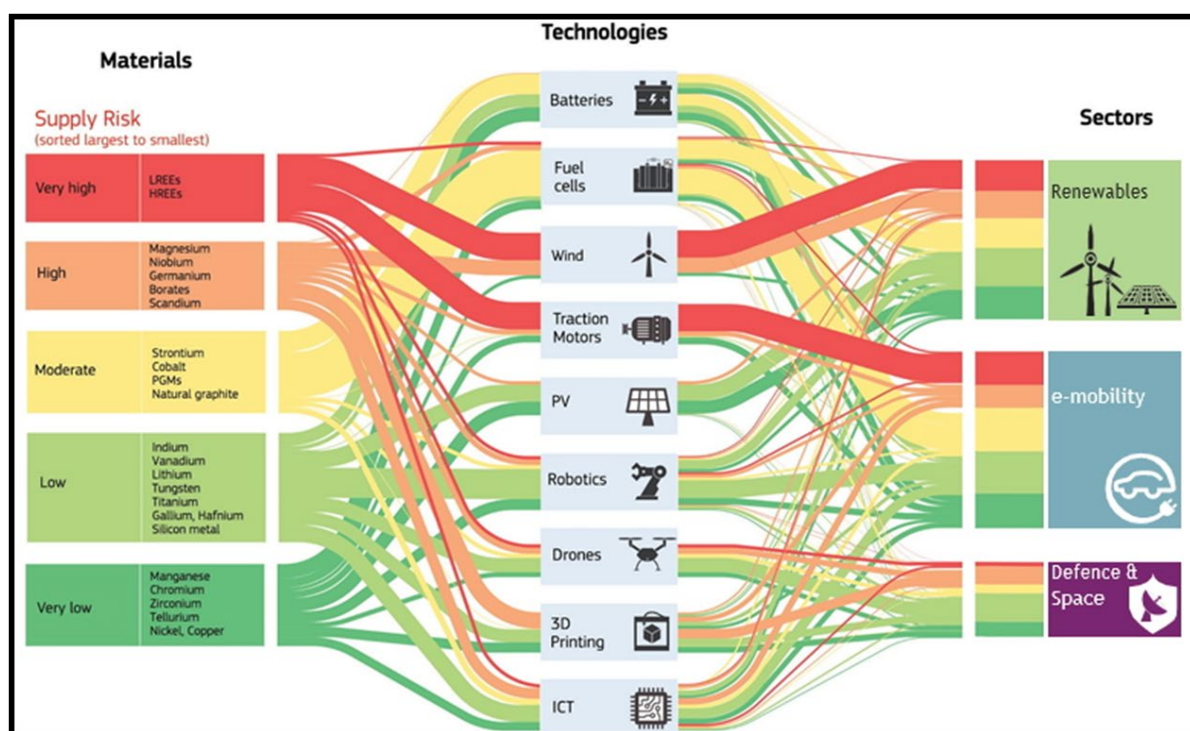


Рис. 2. Потребность в полезных ископаемых новых технологий XXI в. и ожидаемые риски в обеспеченности этими ископаемыми мировой экономики. Условные обозначения: LREEs – легкие редкоземельные, HREEs – тяжелые редкоземельные, ICT – цифровые технологии

Согласно отчету Energy transition Outlook 2018 в мировой энергетической системе произойдет декарбонизация, и в 2050 г. структура первичной энергии будет поровну разделена между ископаемыми и неископаемыми источниками. Эта мегатенденция, или смена парадигмы в производстве и потреблении энергии, потребует широкого ассортимента и большого количества минералов и материалов для удовлетворения быстро растущей потребности в большем количестве ветряных турбин и солнечных фотоэлектрических модулей.

Рост производства возобновляемых источников энергии повышают спрос на добываемые металлы и минералы. Отрасль солнечной и ветровой энергии растет быстрыми темпами, и, в конечном итоге, большая часть потребляемой энергии будет приходиться на энергию ветра, солнца и других возобновляемых источников. Современные солнечные панели требуют мышьяка, боксита, бора, кадмия, угля, меди, галлия, индия, железа, молибдена, свинца, фосфата, селена, кремнезема, теллура и диоксида титана, а в ветровых турбинах используются бокситы, кобальт, медь, железо, молибден и др. элементы. Ряд РЗЭ особенно важны, поскольку они уменьшают вес и размер устройств, необходимых для магнитов в ветровых турбинах. Литий необходим для современных долговечных аккумуляторных систем, а стремление к развитию электротранспорта и экологически чистой энергии создает конкуренцию более дешевым и эффективным батареям для хранения энергии

Человечеству потребуется в 90 раз больше алюминия и в 50 раз больше железа, меди и кремнезема (кварца), чтобы построить необходимые солнечные электростанции и ветряные турбины. Чтобы удовлетворить возросшую потребность только в стали, алюминии и меди, нам придется более чем втрое увеличить мировое производство этих металлов к 2050 г. Более свежие отчеты показывают, что это консервативные оценки.

К 2050 г. и далее прогнозируемая потребность в литии для различных транспортных средств намного превосходит самые оптимистичные текущие производственные прогнозы. Если ежегодно будет производиться 100 млн электрических и гибридных транспортных средств с использованием технологии литиевых батарей, как прогнозируется, то **известные в настоящее время запасы лития могут быть исчерпаны всего за несколько лет.**

Редкоземельные металлы – ключевое условие VI технологического уклада

К редкоземельным металлам (РЗМ) относятся 15 лантаноидов (атомные номера №№57-71), а также скандий (№21) и иттрий (№39).

I. РЗ металлы по нахождению в природе делятся на **тяжелые (ТРЗМ)** – иттриевая группа из девяти металлов: Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu и **легкие (ЛРЗМ)** – цериевая группа из семи металлов: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu. Скандий не относится ни к какой группе и классифицируется от-

дельно. Выделение в некоторых классификациях еще и группы самариевых средних РЗМ представляется мне малообоснованным. Западная геологическая школа также выделяет лишь две группы РЗМ.

II. Существует несколько сотен минералов, содержащих РЗМ, но промышленное значение, как правило, имеют лишь ксенотим – иттриевый минерал, монацит и бастнезит – цериевые минералы, а также комплексные иттрий-цериевые минералы такие как: лопарит, пирохлор, гадолинит, эвдиалит. Остальные редкоземельные металлы входят в виде примесей в эти и некоторые другие минералы.

III. Совместно с РЗ металлами часто рассматривают также **ниобий с танталом**, но они относятся к другой достаточно представительной группе **редких металлов**, куда входят вольфрам, молибден, германий, бериллий,

Основные области применения Редкоземельных металлов		
Металл		Сферы применения
Символ	Наименование	
Лёгкие редкоземельные металлы		
La	Лантан	Стёкла, керамика, автомобильные аккумуляторы и катализаторы, пигменты, люминофоры
Ce	Церий	Полировальные порошки, керамика, люминофоры, стёкла, катализаторы, пигменты, УФ-фильтры
Pr	Празеодим	Керамика, стёкла, оптика, лазеры, пигменты
Nd	Неодим	Постоянные магниты, электромоторы, ИК-фильтры, лазеры, с/х удобрения, катализаторы
Sm	Самарий	Сверхмощные магниты, атомная промышленность, микроволновые фильтры,
Eu	Европий	Поглотитель нейтронов в атомных реакторах, люминофоры, оптика
Тяжёлые редкоземельные металлы		
Y	Иттрий	Керамика, радары, конденсаторы, лазеры, сверхпроводники
Gd	Гадолиний	Керамика, оптика, медицинские приборы, лазеры, сверхпроводники, стёкла
Tb	Тербий	Люминофоры, сплав Tb-Fe - лучший магнитоstrictionный материал
Dy	Диспрозий	Легирование Zn и Zr сплавов, лазеры, катализаторы, ядерная энергетика
Ho	Гольмий	Керамика, лазеры, атомная промышленность, сверхпроводящие магниты
Er	Эрбий	Керамика, атомная промышленность, красители для стекла, лазеры
Tm	Тулий	Рентгеновские установки, томографы, электронно-лучевые трубки
Yb	Иттербий	Металлургия, добавки к спецсплавам, химическая промышленность
Lu	Лютеций	Носители информации, магниты, лазеры

Рис. 3. Основные области применения редкоземельных металлов

литий и целый ряд других металлов. Ниобий практически всегда встречается во всех типах редкоземельных месторождений.

IV. По распространенности в земной коре (кларки элементов) РЗМ существенно превосходят кларки благородных металлов. Так золота в земной коре содержится в среднем 0,004 г/т, а кларк самого редкого РЗМ элемента лютеция равен 0,3 г/т, что на два порядка больше, чем у золота.

V. По сути, правильнее было бы говорить не о редкоземельных, а о «трудноземельных» металлах, так как технология их извлечения и особенно разделения на те же порядки сложнее, а значит и дороже, чем у того же золота или платины, которые зачастую хорошо извлекаются обычной гравитацией.

На рис. 3 приведены области применения всех редкоземельных металлов (РЗМ).

Годовой объём производства постоянных неодимовых магнитов был на уровне 135 тыс.т в 2016 г. Основные высокотехнологичные области применения: цифровая и бытовая электроника, автомобильная отрасль и возобновляемая энергетика, благодаря которым, по некоторым оценкам, к 2025 г. спрос на неодимовые магниты может составить около 200 тыс.т.

Рынок электроники, электромобили и производство ветряных турбин являются самыми крупными сегментами мирового потребления неодимовых магнитов.

До 75% РЗМ используется в оборонной промышленности! (рис. 4)

Лантан	очки ночного видения
Неодим	лазерные дальнометры, системы наведения, средства связи
Европий	флуоресцентные лампы и люминофоры в лампах и мониторах
Эрбий	усилители в волоконно-оптической передаче данных
Самарий	постоянные магниты, устойчивые при высоких температурах
Самарий	высокоточное оружие
Самарий	производство «белого шума» в стелс-технологиях

Рис. 4. Оборонное использование редкоземельных металлов

Из суммарных мировых запасов РЗМ В 402 млн т в 18 уникальных месторождениях находится 355 млн т, или 88,3%, в т.ч. в месторождении JONGJU (КНДР) – 216 млн т, или 53,7%.

Диаграмма производства РЗЭ показывает доминирование Китая в производстве редкоземельных элементов в период с 1994 по 2022 гг. Соединенные Штаты были крупным производителем в 1990-е гг., но дешевые материалы, продаваемые Китаем, вынудили рудники в Соединенных Штатах и других странах отказаться от производства. Поскольку Китай ограничил экспорт, а цены резко выросли в 2009 и 2010 гг., шахты в Австралии и США снова начали активизироваться. В 2018 г. стали доступны данные

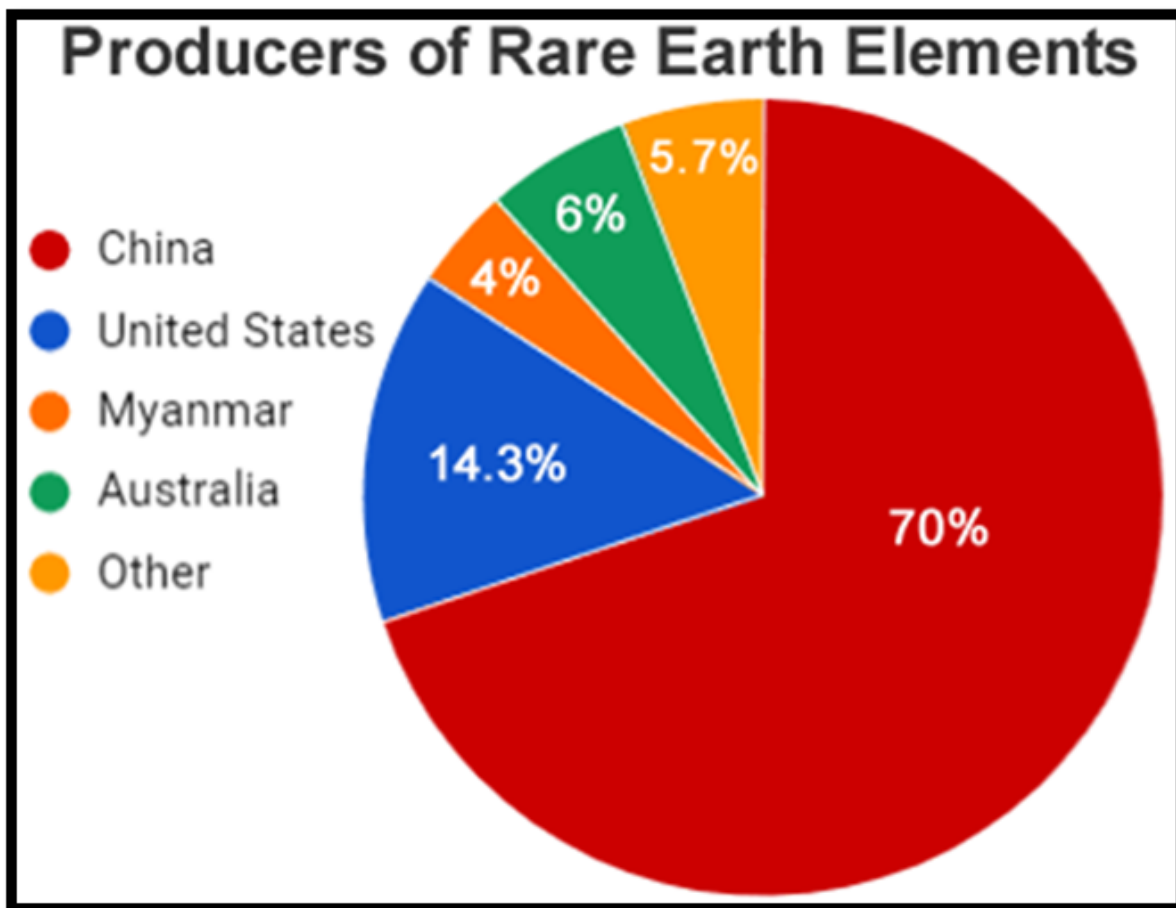


Рис. 5. Абсолютное доминирование Китая в добыче РЗМ

из Бирмы / Мьянмы, что привело к увеличению добычи, которое, возможно, имело место, но не сообщалось до 2018 г. График составлен Geology.com с использованием данных Геологической службы США.

За период с 2000 г. глобальный спрос на РЗМ в физическом выражении вырос в 25 раз. Потребление обеспечивают высокотехнологичные сектора и оборонно-промышленный комплекс. Китай при этом потребляет 54% от всего объема производимых РЗМ, Япония и Южная Корея – 24%, Германия и Франция – 13%, Россия – 1,6%.

Мировое производство основных материалов для литий-ионных аккумуляторов непрерывно растет (так называемые «батареи металлы»). Литий, графит, никель, марганец и кобальт представляют собой пять ключевых элементов современных LIB (литий-ионных батарей). Мировое производство распределяется неравномерно, и в нем доминируют несколько стран. Китай – мировой лидер батарейной индустрии! Всего за 4 года – с 2016 по 2020 гг. – Китай увеличил выпуск литий-ионных батарей с 28 до 174 ГВт·ч, или в 6,2 раза, или на 512%! Литий-ионные аккумуляторы (LIB) играют важную роль в нашем высокоэлектрифицированном мире и будут продолжать лидировать в технологических инновациях. Миллионы авто-

мобилей оснащены LiB или напрямую питаются от них, что загрязнение окружающей среды и снижает потребление энергии. Это быстро растущее использование LiB в транспортных средствах приведет к большому количеству затрат...

Революция в области электромобилей открывает золотой век для аккумуляторного сырья, что лучше всего отражается в резком увеличении производства и спроса на литий, кобальт, никель, алюминий, медь, марганец, графит и ряд других металлов. Кроме того, растущая потребность в хранении энергии, в электрических средствах передвижения, велосипедах, электрификации инструментов и в других сферах использования аккумуляторных батарей еще больше повышает интерес к этим товарам. Стратегические решения в отношении этих материалов различаются в зависимости от игроков отрасли, таких как автомобильные компании, производители аккумуляторов, компании по добыче и переработке материалов и финансовые инвесторы. Всем игрокам необходимо понять сложности и динамику этого быстроменяющегося рынка. Недавние скачки цен на материалы для батарей вызвали обеспокоенность по поводу долгосрочной доступности данных товаров и высветили разную динамику предложения.

В последние 10 лет произошел резкий рост производства «батарейных» ископаемых: лития, кобальта, марганца и графита (рис. 6).

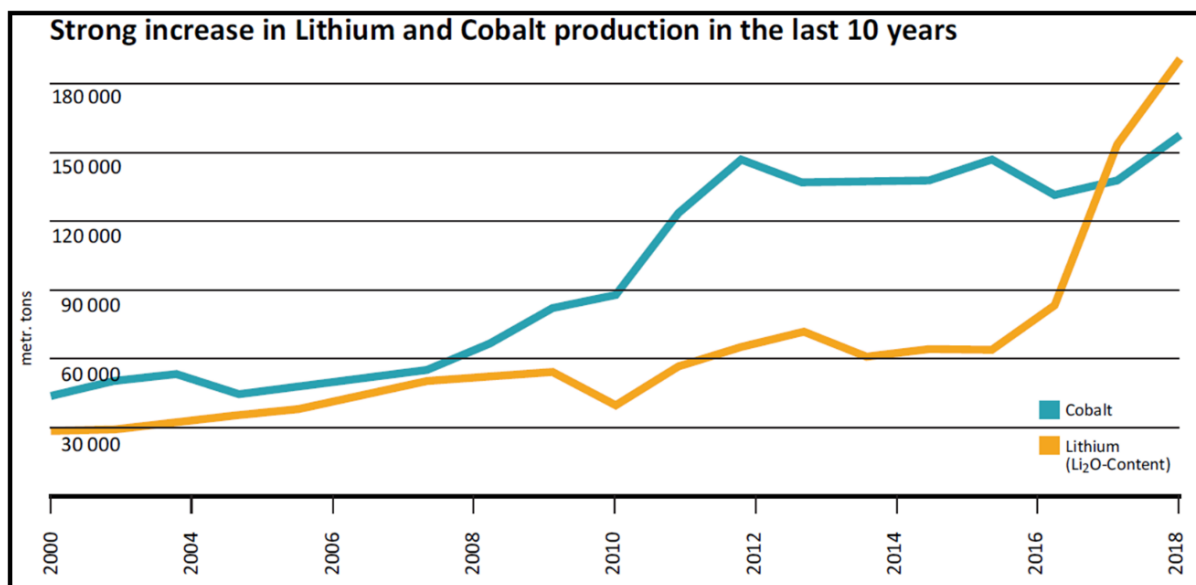


Рис 6. Взрывной рост добычи «батарейных» лития и кобальта

Двенадцать стран в основном обеспечивают глобальную продукцию батарейных металлов. Главную роль играют: Китай, ДРК, ЮАР, Австралия, Индонезия, Филиппины и Чили. Причем, страны так называемого «Литиевого треугольника», куда входят Чили, Аргентина и Боливия, содержит 60,6% мировых запасов (10,3 млн т) и 64,6% мировых ресурсов (47 млн т) лития.

79% спроса лития (1,42 млн т/год) в 2030 г будет приходиться на легковые электромобили по сравнению с 317 тыс.т сегодня. Оставшаяся часть будущего спроса будет приходиться в основном на электронику, накопители энергии и гаджеты, в том числе такие как электронные велосипеды.

Дефицит **графита** – мегапроблема европейских производителей батарей. Поскольку Европа хочет заявить о своей технологической независимости, став лидером в производстве аккумуляторов следующего поколения, ей придется начать с производства собственного графита. Проблема в том, что почти все его партии сейчас поступают из Азии, в основном из Китая. Таким образом, французская Carbone Savoie и немецкая SGL Carbon, единственные европейские фирмы, которые, как считается, могут принять этот вызов, были заключены в амбициозный альянс по аккумуляторным батареям, созданный Брюсселем в прошлом году.

И несколько слов о **водородной** энергетике и экономике, о чем беспрерывно говорят в западном мире и Китае. На рис. 7, 8 и 9 приведен типовой вид водородной географии.

Но... переход на водородную экономику при производстве водорода практически невозможен! Водород как вторичный ресурс по определению дороже первичных углеводородов. При основном способе получения водорода за счёт конверсии метана выбросы CO₂ с учетом потерь природного газа на магистральном транспорте и в процессе выработки электроэнергии в энергосистеме достигают 9,5 к весу H₂.

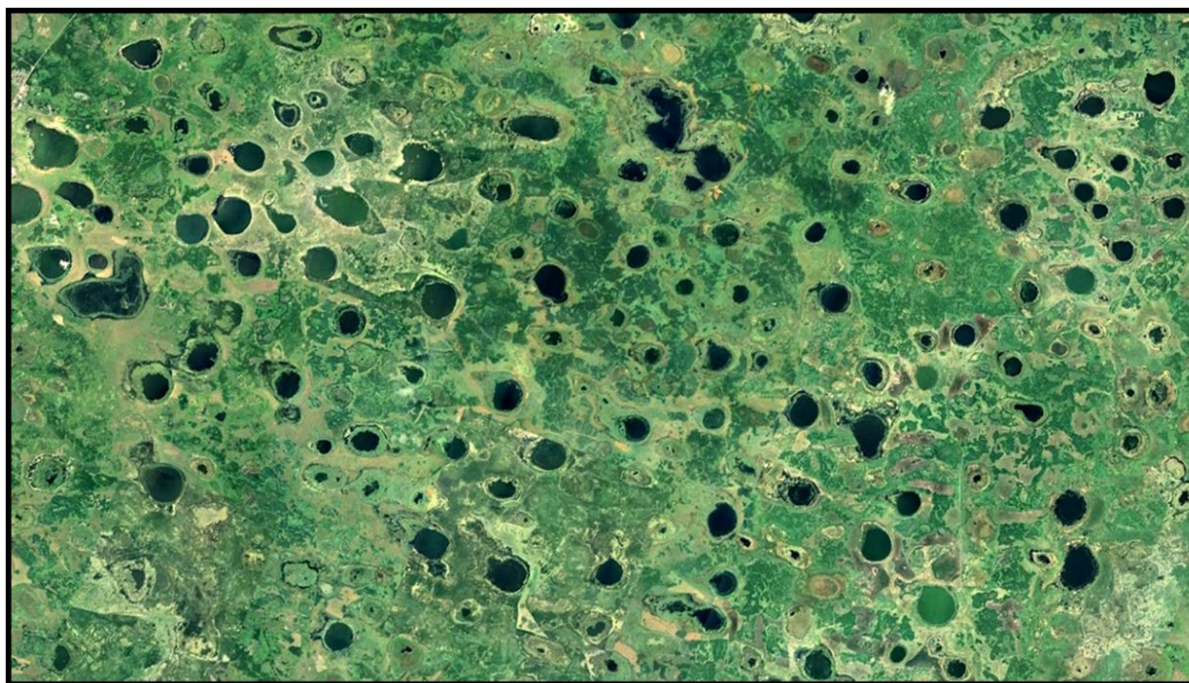


Рис. 7. Водородные озера в Омской области



Рис. 8. Разрушение пашни выходами водорода в Курганской области



Рис. 9. Замерзший водород во льду Байкала

В кубометре метана энергии в 8 раз больше чем в кубометре водорода! Это значит, что для перевода углеводородных ТЭС на водород необходимо либо в 8 раз увеличить диаметр труб, либо резко повысить давление в трубах, опять же за счет реконструкции компрессорных станций в мире. Десятки лет времени и десятки триллионов долларов!

Для безуглеродного получения водорода методом гидролиза воды требуется 9 м³ дистиллированной воды на 1 т водорода, следовательно, пресной воды понадобится не менее 18 м³. Для получения необходимых десятков миллионов тонн водорода понадобится израсходовать сотни миллионов кубометров пресной воды – абсолютно приоритетного полезного ископаемого. В погоне за водородом любой ценой можно превратить в пустыню планету Земля с вытекающим отсюда вымиранием большей части человечества.

Остаётся ещё безуглеродный метод получения водорода за счет пиролиза (сжигания в бескислородной обстановке) метана. Дорого! Необходимо строительство новых пиролизных заводов...

Поэтому водородная экономика может состояться лишь при нахождении месторождений природного водорода – как мы находим природный газ. В противном случае мы будем иметь региональные водородные успехи, которые не будут играть существенной роли в экономике!

Проиллюстрирую водородные «страдания» подборкой мировых водородных проблем и казусов.

По оценкам Bloomberg New Energy Finance, потребуется около \$11 трлн на расходы на производство и инфраструктурные мощности, чтобы удовлетворить хотя бы четверть мировых потребностей в энергии за счет водорода.

«Политикам пора принять науку», – заявил в феврале в Твиттере исполнительный директор Volkswagen AG Герберт Дисс. «Зеленый водород необходим для сталелитейной, химической, аэрокосмической промышленности... и не должен попадать в автомобили. Слишком дорого, неэффективно, медленно и сложно в развертывании и транспортировке».

Toyota – компания, стоящая за Mirai, автомобилем на водородных топливных элементах, впервые проданным в 2014 г., который Масахико Маэда, главный технический директор компании, назвал «отправной точкой для полноценного распространения водородных автомобилей». Компания не была сильным продавцом. К концу 2020 г., после шести лет работы на рынке, она продала 11 тыс. автомобилей по всему миру. Mirai – дорогая машина, продаваемая в два раза дороже, чем Camry аналогичного размера. Но годы усилий привели к тому, что сегодня на дорогах Японии появилось чуть более 4 тыс. автомобилей с водородным двигателем, что составляет десятую часть от цели правительства, поставленной всего пять лет назад.

Калифорния, которая хочет, чтобы к 2030 г. в эксплуатации был 1 млн водородных автомобилей и 1 тыс. заправок станций, в настоящее время насчитывает 11 тыс. автомобилей и 48 станций.

В Норвегии, где налоговые льготы вытеснили автомобили, работающие на ископаемом топливе, быстрее, чем где-либо на Земле, в этом году люди купили только 12 автомобилей с водородным двигателем, что со-

ставляет всего 0,01% от всех продаж. Водородные автомобили пользуются теми же льготами, что и автомобили с батарейным питанием в Норвегии, а автомобили с подключаемыми модулями составили почти 85% продаж в 2021 г.

В Норвегии всего две водородные заправочные станции. В Канаде пять. К концу 2020 г. в Японии их было 137.

Ситуация с хваленной водородной экономикой Японии не улучшится в ближайшее время. Планы страны по поставкам водорода в будущем сводятся к импорту его в больших количествах из Австралии, где он будет производиться из угля с использованием несуществующей технологии улавливания углерода.

Даже если бы был запас зеленого водорода, автобусы на топливных элементах, которые Toyota продает с 2018 г., не оправдали своих обещаний. Согласно Financial Times, экономика им просто не по карману. Начнем с того, что они стоят \$900 тыс. за аренду на 6 лет по сравнению с \$220 тыс. за дизельный автобус со сроком полезного использования 15 лет.

Водород может иметь значительные перспективы, когда речь идет о снижении выбросов углерода в сталелитейной промышленности, но как транспортное топливо он просто не может конкурировать с аккумуляторными электромобилями. Безумие определяется как повторение одного и того же действия снова и снова с ожиданием разных результатов.

Сверхкраткое резюме: прошлое настоящее и будущее человечества всегда зависели от полезных ископаемых. Именно прогресс технологий вынудил человечество в XIX в. заняться подготовкой новых специалистов геологов, поскольку кустарные методы рудознатцев уже не могли открыть в нужных количествах и в нужных местах даже старые известные металлы – железо, медь, олово и другие, не говоря уже о новых уране, литии, редкоземельных и других. Прогресс человечества совершенно невозможен без сверхусилий геологии и геологов!