

# МЕТАЛЛУРГИЯ

## БУДУЩЕЕ ДОБЫЧИ МЕТАЛЛОВ

Истощение месторождений полезных ископаемых на суше создает стимулы для поиска новых способов их добычи. В последние годы активно применяются микроорганизмы для извлечения металлов из бедных руд и техногенных отходов. Например, переработка 1 млн штук сотовых телефонов позволяет получить 16 тонн меди, 350 кг серебра, 34 кг золота и почти 15 кг палладия.

Растет заинтересованность в освоении глубоководных месторождений, содержащих практически неисчерпаемые запасы редкоземельных металлов.

Перспектива коммерческого освоения космических недр также уже не выглядит научной фантастикой – стартуют проекты по добыче металлов на Луне и астероидах и их переработке на космических орбитальных фабриках. Об этих прорывных технологиях и пойдет речь в данном выпуске.

### Трендлеттер выходит 1–2 раза в месяц.

Каждый выпуск посвящен одной теме:

- Медицина и здравоохранение
- Рациональное природопользование
- Информационно-коммуникационные технологии
- Новые материалы и нанотехнологии
- Биотехнологии
- Транспортные средства и системы
- Энергоэффективность и энергосбережение

### – Спецвыпуск

Мониторинг глобальных технологических трендов проводится Институтом статистических исследований и экономики знаний Высшей школы экономики (issek.hse.ru) в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

*При подготовке трендлеттера использовались следующие источники:*

ППрогноз научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 года ([prognoz2030.hse.ru](http://prognoz2030.hse.ru)), материалы научного журнала «Форсайт» ([foresight-journal.hse.ru](http://foresight-journal.hse.ru)), данные Web of Science, Orbit, [marketsandmarkets.com](http://marketsandmarkets.com), [transparencymarketresearch.com](http://transparencymarketresearch.com), [mining.com](http://mining.com), [mining-technology.com](http://mining-technology.com), [nasa.gov](http://nasa.gov), [asterank.com](http://asterank.com), [space.com](http://space.com), [nationalgeographic.com](http://nationalgeographic.com), [deepspaceindustries.com](http://deepspaceindustries.com), [businessinsider.com](http://businessinsider.com), [planetaryresources.com](http://planetaryresources.com) и др.

Более детальную информацию о результатах исследования можно получить в ИСИЭЗ НИУ ВШЭ: [issek@hse.ru](mailto:issek@hse.ru), +7 (495) 621-82-74.

### Над выпуском работали:

Над выпуском работали: Светлана Слободяник, Дмитрий Королев, Виталий Дементьев, Юлия Мильшина, Владимир Пучков.

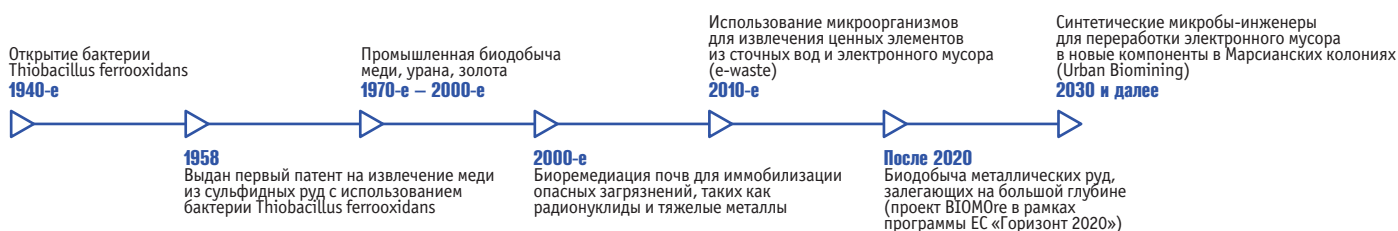
© Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 2018

## БАКТЕРИИ-МЕТАЛЛУРГИ

Истощение мировых запасов богатых металлами руд требует развития технологий, направленных на разработку бедных месторождений. Перспективным становится также получение ценных металлов из электронного мусора, объемы которого неуклонно растут. Применение бактерий позволяет существенно повысить степень извлечения металлов из горных пород при относительно низких затратах труда, энергии и основного капитала. Это делает экономически рентабельной переработку бедных руд и техногенных отходов, позволяет добывать металлы из руд глубокого залегания без ущерба для ландшафта.

Биодобыча – это процесс использования микроорганизмов для извлечения металлов из горных пород или рудников. Окисляя сульфидные руды, микробы растворяют металлы (медь, железо и др.) и облегчают процесс их добычи (биовыщелачивание). Другие металлы (например, золото) непосредственно не растворяются, но становятся более доступными для традиционных методов добычи, поскольку микробы удаляют окружающие их минералы (биоокисление). Начиная с 1960-х гг. «зеленые» биотехнологии широко используются в промышленной добыче меди, урана и золота. С открытием новых микроорганизмов становится возможным их применение в разработке низкосортных комплексных руд, извлечении ценных металлов из электронного мусора (e-waste), биоремедиации почв и сточных вод. В перспективе двух-трех десятилетий бактерии начнут добывать металлы на астероидах и других планетах, а микробы-инженеры научатся осуществлять сквозную пересборку электронных компонентов.

### Технологическая эволюция



### Эффекты

- Повышение уровня извлечения металлической руды в шахте в среднем с 60 до 90% благодаря использованию бактерий
- Экономическая рентабельность добычи бедных руд, содержащих менее 0,5% меди
- Снижение энергозатрат до 75% при добыче металлических руд
- Уменьшение негативных экологических последствий горнодобывающих работ (эрозия склонов, образование шахтных отвалов и т.д.)
- Вовлечение в хозяйственный оборот цветных и драгоценных металлов из электронного мусора (к примеру, в США электронный мусор занимает 2% в общем объеме и 70% в объеме токсичных отходов)
- Снижение числа несчастных случаев в шахтах

### Риски

- Неустойчивость бактерий к низким температурам

### Оценки рынка

**\$5 млрд**

может достичь объем мирового рынка переработки электронного мусора в 2020 г. (среднегодовые темпы роста – 21% с 2015–2020 гг.)

**\$172 млрд**

может составить мировой рынок меди в 2023 г. (среднегодовые темпы роста – 4,9% в 2015–2023 гг.)

**Свыше 30%**

меди в Чили добывается методом биовыщелачивания

Ок. 15% меди и 5% золота добывается в мире с использованием технологий биодобычи. Центры биодобычи сосредоточены в медных рудниках Чили, на золотых приисках Ганы, Южной Африки, Средней Азии и Австралии

### Драйверы

- ↑ Истощение мировых запасов богатых металлами руд; вовлечение в эксплуатацию бедных и забалансовых руд, хвостов и отвалов
- ↑ Снижение издержек добычи, низкая энергозатратность
- ↑ Дальнейшее изучение бактерий и обнаружение новейших организмов
- ↑ Возможный дефицит на мировом рынке меди в 2028 г. в размере 10 млн т

### Барьеры

- ↓ Патентование инновационных технологических решений препятствует их использованию другими компаниями
- ↓ Процесс бактериального выщелачивания может занимать месяцы и даже десятилетия
- ↓ Высокая стоимость капитальных вложений в технологические разработки. Например, стоимость демонстрационного завода BioCOP (Чили) мощностью 20 тыс. т – \$60 млн

**Структурный анализ:**  
возможности экологически чистого процесса извлечения металлов из электронного мусора с применением метода биовыщелачивания

Металл	Содержание металлов в печатной плате, мг/г		Извлечение металлов методом биовыщелачивания, %	
	компьютер	мобильный телефон	компьютер	мобильный телефон
Медь	300	360	60,3	87,5
Цинк	37	8	71,1	85,7
Никель	3,8	8,5	71,1	81,9

### Компании и стартапы

**Компании (производители меди методом кучного выщелачивания):** CODELCO, BHP Billiton, Freeport, Talvivaara Mining Company Plc

**Научные центры:** BIOHIDRICA, Biotecnologías del Agua Ltda., Biosigma, Indie Bio

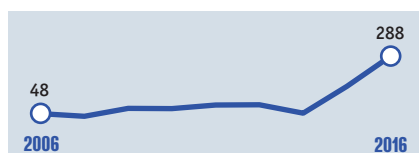
**Стартапы:** Deep Space Industries, Planetary Resources

**В РФ:** ОАО «Покровский рудник», ПАО «Селигдар» (добыча золота), ЗАО «Русская медная компания» (добыча меди)

### Международные научные публикации



### Международные патентные заявки



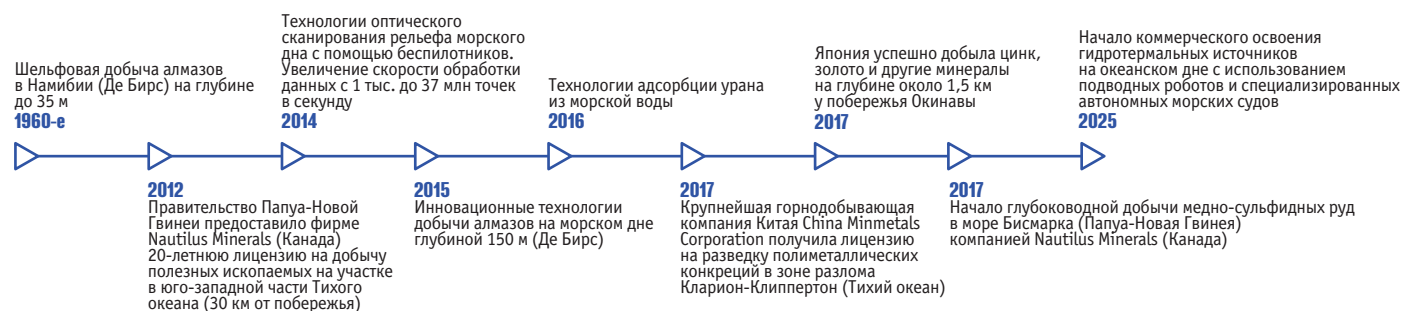
### Уровень развития технологии в России

«Возможность альянсов» – наличие отдельных конкурентоспособных коллективов, осуществляющих исследования на высоком уровне и способных «на равных» сотрудничать с мировыми лидерами

## ГЛУБОКОВОДНАЯ ДОБЫЧА

Исследования морского дна показывают, что глубоководные месторождения содержат гигантские запасы марганца, кобальта, а также меди, цинка, золота и других металлов. Концентрация редкоземельных металлов (РЗМ) в морских глубинах в десятки раз выше, чем в месторождениях на суше. Рывок в развитии технологий глубоководной разведки и добычи снимет проблему дефицита металлов в мире. Залежи металлов на океанском дне обычно встречаются в трех формах: железомарганцевые конкреции (высокоминерализованные стяжения размером с картофель), кобальтовые корки (твердые покрытия на боках подводных вулканов) и полиметаллические массивные сульфиды (отложения, образовавшиеся в горячих и богатых минералами глубоководных хребтах). Добыча полезных ископаемых с морского дна требует создания уникальной инженерной системы: подводной карьерной техники с дистанционным управлением, вертикальной системы подъема шлама и специализированных судов, осуществляющих управление всем технологическим циклом месторождения – от доставки оборудования до подъема, осушения и складирования шлама. Первая «плавающая шахта» по добыче металлов может быть спущена на воду уже в 2018 г.

### Технологическая эволюция



### Эффекты

- Восполнение дефицита редкоземельных металлов (европий, эрбий, иттрий и др.) на мировом рынке
- Разработка природоохранных правил в области глубоководной добычи Международным органом по морскому дну (2020 г.)

### Риски

- Исчезновение экзотических и малоизвестных экосистем на океанском дне. Гидротермальные источники, содержащие запасы металлов, поддерживают жизнь вдали от солнечного света и являются домом для улиток, губок, фиолетовых осьминогов, белых крабов и морских коньков
- Загрязнение прибрежных зон и среды обитания рыб и других организмов выемкой токсичных тяжелых металлов

### Оценки рынка

в \$150 трлн

оцениваются глубоководные запасы золота

Более 4 млрд т

урана содержится в мировом океане (по оценкам DOE США). Этого достаточно для удовлетворения глобальных энергетических потребностей в течение следующих 10 тыс. лет.

125 тыс. т

достиг мировой объем производства РЗМ в 2015 г. Доля Китая в мировом производстве составила 83%.

### Драйверы

- ↑ Быстрый рост спроса на РЗМ в «зеленой» энергетике, ИКТ, электронике и робототехнике. Концентрация теллура (ключевой металл для высокоэффективных солнечных батарей) в глубоководных морских отложениях в 50 тыс. раз выше, чем в наземных рудах
- ↑ Монополизированное положение Китая на рынке РЗМ (95% в структуре мирового производства)
- ↑ Выдача лицензий на разведку полиметаллических конкреций Международным органом по морскому дну (International Seabed Authority) компаниям из Индии, Бразилии, Китая, Сингапура и России

### Барьеры

- ↓ Экстремальные условия добычи на морском дне: давление на глубине 1-2 км в 160 раз выше, чем на суше; перепады температур – от отрицательных, до сотен градусов выше точки кипения
- ↓ Высокая стоимость оборудования для проведения глубоководных работ и слабая изученность дна океана
- ↓ Призывы к мораторию на разработку морского дна со стороны природоохранных организаций, рыбаков и жителей прибрежных районов, местных властей

### Структурный анализ: содержание металлов в марганцевых конкрециях в различных морских регионах

Элементы	Зона Кларион-Клиппертон	Бассейн Перу	Индийский океан	Острова Кука
Марганец**	28,4	34,2	24,4	16,1
Железо**	6,16	6,12	7,14	16,1
Медь*	10714	5988	10406	2268
Никель*	13002	13008	11010	3827
Кобальт*	2098	475	1111	4124
Титан**	0,32	0,16	0,42	1,15
Теллур*	3,6	1,7	40	23
Таллий*	199	129	347	138
Другие РЗМ и иттрий*	813	403	1039	1707
Цирконий*	307	325	752	588

\* граммов на тонну \*\* процент по весу

### Компании и стартапы

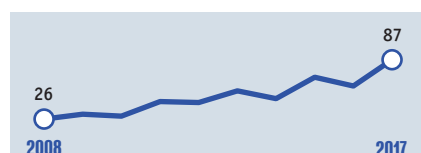
**Nautilus Minerals** – проект глубоководной выемки руд, богатых медью, золотом и цинком на расстоянии 30 км от побережья Папуа Новой Гвинеи

**China Minmetals Corporation** – кон-тракты на разведку полиметаллических конкреций (2017 г.) в восточной части Тихого океана

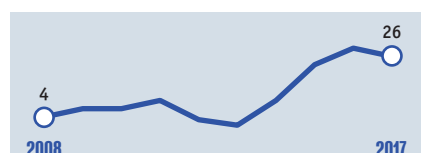
**Kongsberg Maritime** – производство систем автоматизации судов и морских объектов, спутниковой навигации и гидроакустики

**Neptune Minerals** – изучение массивных сульфидных руд

### Международные научные публикации



### Международные патентные заявки



### Уровень развития технологии в России

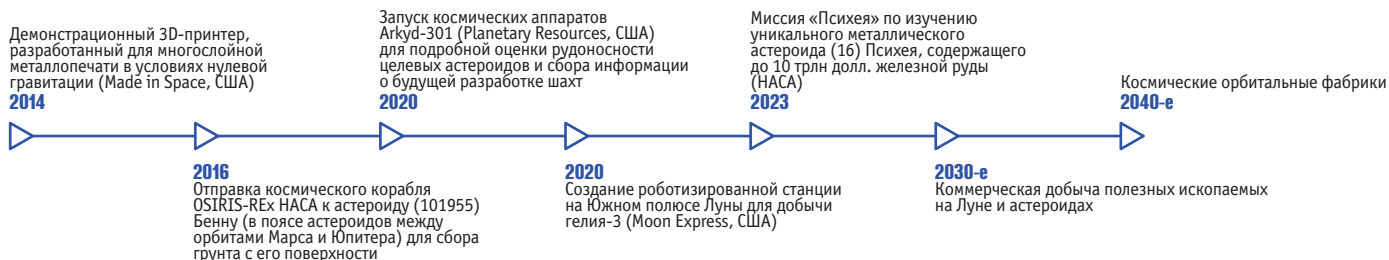
«Заделы» – наличие базовых знаний, компетенций, инфраструктуры, которые могут быть использованы для форсированного развития соответствующих направлений исследований

## ОСВОЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ НЕДР

Появление новых технологий позволяет приступить к коммерческому освоению космоса уже в ближайшие десятилетия. Формирующаяся база по экономической оценке запасов в поясе астероидов показывает, что стоимость космических ресурсов в расчете на одного жителя Земли составляет около 100 млрд долл. Технологическая доступность и экономическая рентабельность их извлечения снимут проблему ресурсной ограниченности.

Помимо железа, никеля и магния, астероиды также содержат драгоценные и редкоземельные металлы (рений, иридий и др.). Добыча полезных ископаемых на Луне и астероидах может вестись по-разному: разработка месторождений открытым способом, добыча в шахтах, сбор металлов с поверхности с помощью магнитов, использование микробов для биодобычи и другие. Освоение космических недр требует создания автономных роботизированных станций для добычи металлов и развития космической инфраструктуры – для их доставки на Землю. Реализация концепции орбитальных космических фабрик также позволит выносить «грязные» производства за пределы нашей планеты.

### Технологическая эволюция



### Эффекты

- Изучение астероидов, развитие системы мониторинга и предотвращения возможного столкновения с потенциально опасными объектами, способными вызвать катастрофу на Земле
- Строительство космической инфраструктуры позволит снизить эксплуатационные расходы космических полетов (например, создание дозаправочных станций в космосе)
- Потенциально опасные процессы могут выполняться в космосе с минимальным экологическим риском для Земли или других планет

### Риски

- Присвоение космических недр отдельными государствами
- Перенос земных микроорганизмов на другие космические объекты

### Оценки рынка

**\$700** квинтиллионов,

или \$100 млрд, на каждого жителя Земли – стоимость ресурсов в поясе астероидов

**\$10** трлн

– стоимость железной руды на астероиде (16) Психея (НАСА)

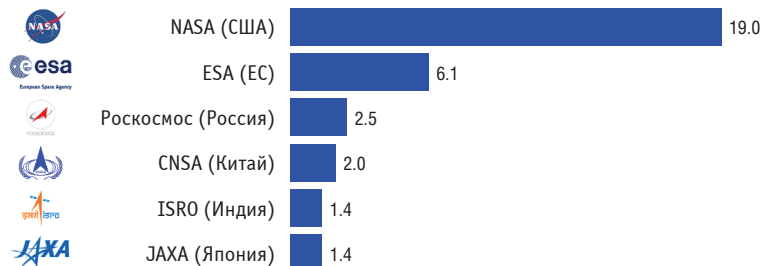
### Драйверы

- ↑ Развитие фотоники и робототехники
- ↑ Быстрое снижение стоимости коммерческих космических запусков за счет использования многоразовых ракет (\$35 млн на ракете «Союз» и \$250 тыс. на ракете Space X)
- ↑ Закон о конкурентоспособности коммерческих космических кораблей (The US Commercial Space Launch Competitiveness Act) с целью правового обеспечения добычи ресурсов на Луне (2010 г., США)

### Барьеры

- ↓ Действие Договора о космосе 1967 г., согласно которому космическое пространство, включая Луну и другие небесные тела, не подлежит национальному присвоению
- ↓ Большие инвестиции в космическое оборудование и длительные сроки отдачи от них
- ↓ Астрономическая стоимость первых металлов. Так, миссия OSIRIS-REx стоимостью около \$1 млрд позволит доставить на Землю всего 2 кг грунта с астероида.

### Структурный анализ: бюджеты крупнейших космических агентств мира, 2017 г. (млрд долл.)



### Компании и стартапы

**SpaceX** – разработка возвращаемых ракет-носителей тяжелого класса для организации космических перевозок и регулярной доставки грузов на орбиту Земли

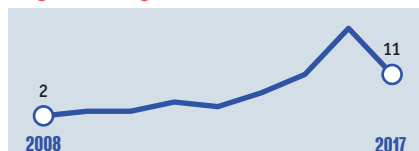
**Deep Space Industries; Planetary Resources** – добыча ресурсов на астероидах

**Moon Express** – добыча полезных ископаемых на Луне и их доставка на Землю

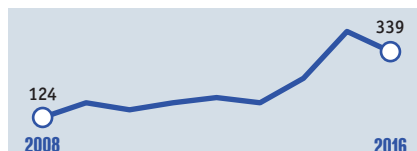
**Rocket Lab** – разработка ракет сверхлегкого класса для коммерческих запусков и доставки на орбиту мелких грузов

**Made in Space** – производство продукции в условиях невесомости, космические фабрики

### Международные научные публикации



### Международные патентные заявки



### Уровень развития технологии в России

«Заделы» – наличие базовых знаний, компетенций, инфраструктуры, которые могут быть использованы для форсированного развития соответствующих направлений исследований