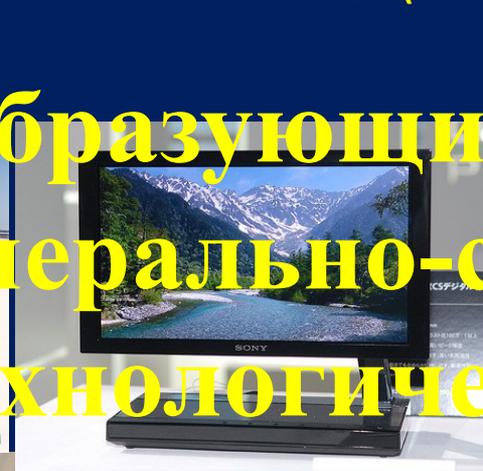


«Истощение недр порождает призрак мира, в котором ресурсы слишком дороги для использования, но не мир без ресурсов»

McDivitt and Manners (1974, p. 10–11) Minerals and men

Модели минералообразующих систем: Путь развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности

Н. С. Бортников





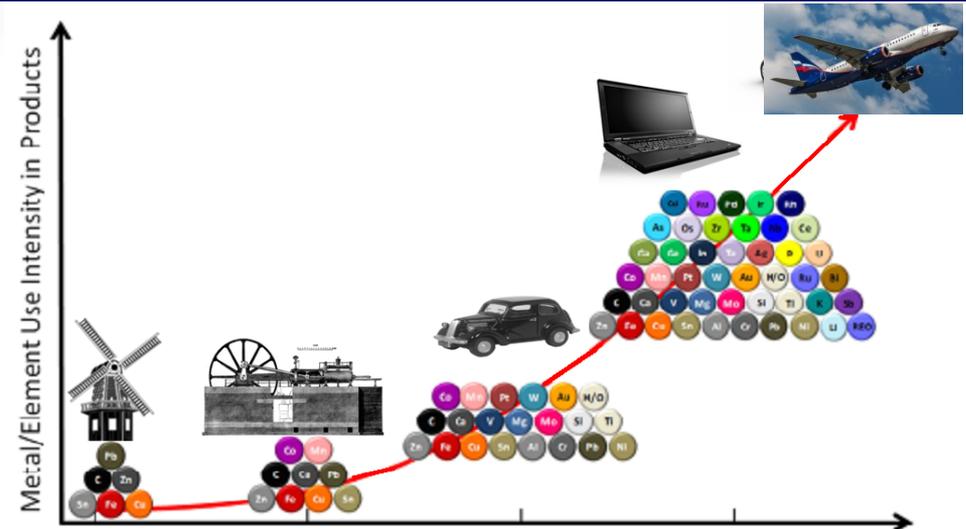
МЕТАЛЛЫ ЖИЗНЕННО НЕОБХОДИМЫ ДЛЯ СУЩЕСТВОВАНИЯ и РАЗВИТИЯ ЦИВИЛИЗАЦИИ!

**Невозможно представить сферу
человеческой деятельности, которая не
включает металлы в том или ином виде:**

**требуются для производства изделий,
используемых ежедневно: от кухни и
сотовых телефонов до строительства домов,
мостов, поездов, самолетов, солнечных
панелей, суперкомпьютеров и др.**

**используются в «скрытом» виде:
катализаторы, медицина и удобрения**

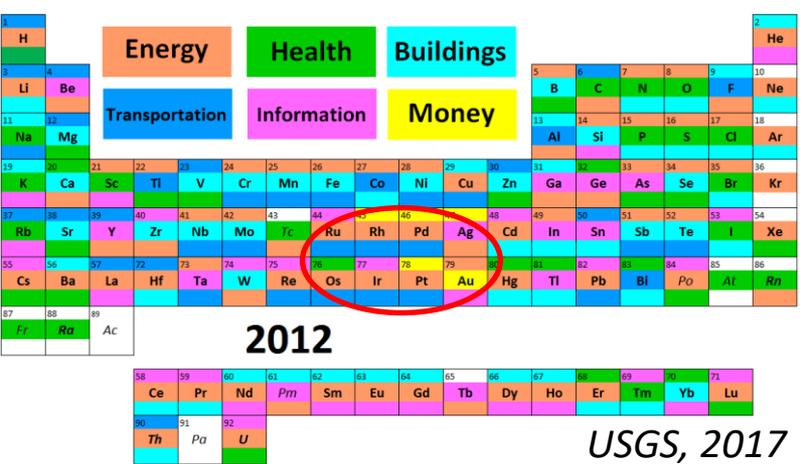
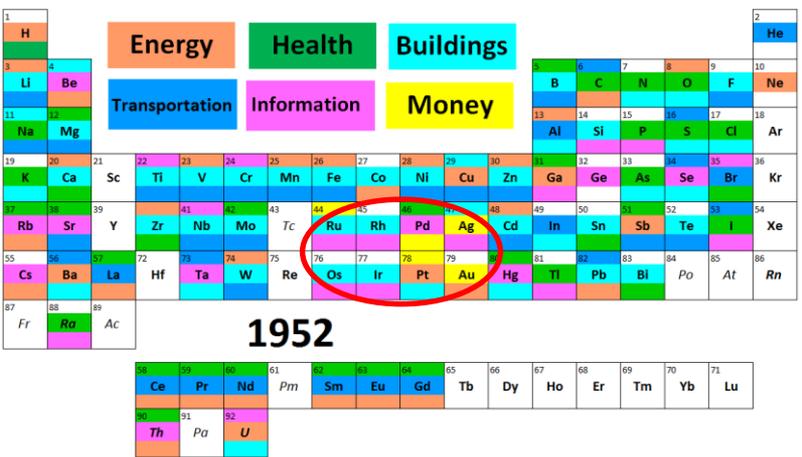
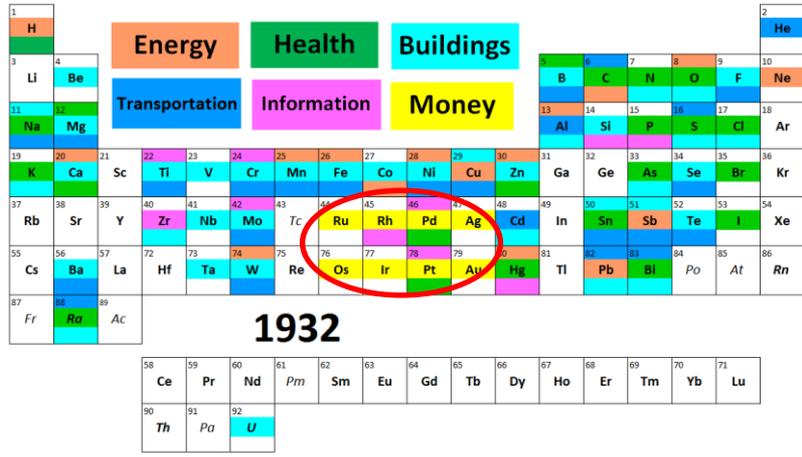
Использование “новых металлов” в современных технологиях улучшает условия жизни!



Несколько веков назад использовалось незначительное число материалов и металлов: дерево, кирпич, железо, медь, олово, золото и серебро.

В 20-ом веке произошел резкий скачок в числе используемых металлов, так и в их количестве. В 1980-х, требовалось 12 металлов для создания компьютера, сейчас – около 60, а самолета - 80 – значительная доля известных в природе

Graedal et al., 2015



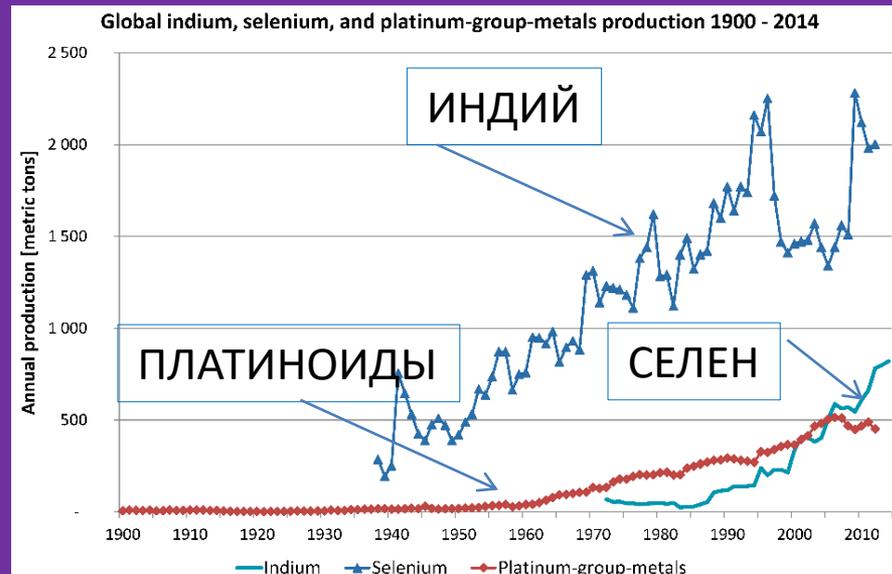
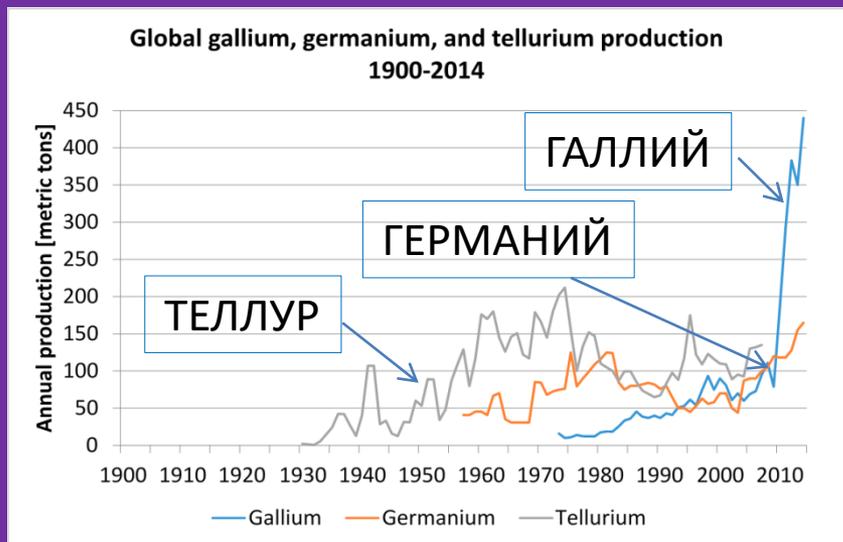
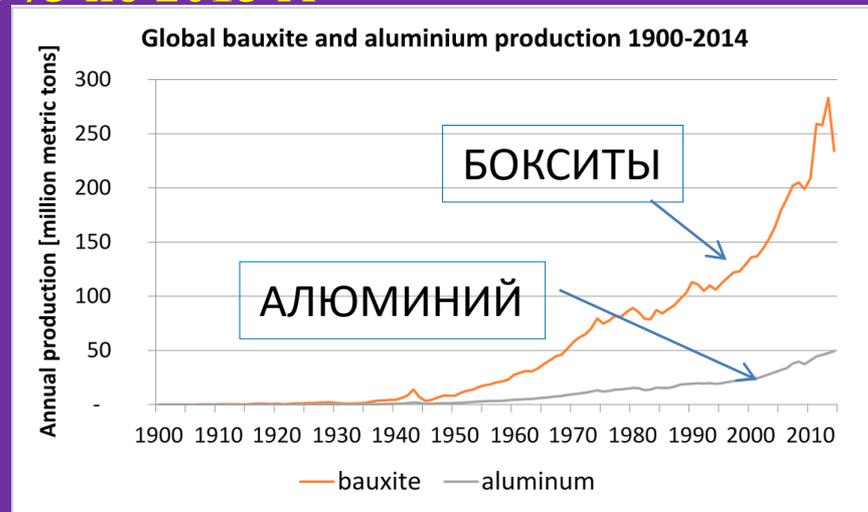
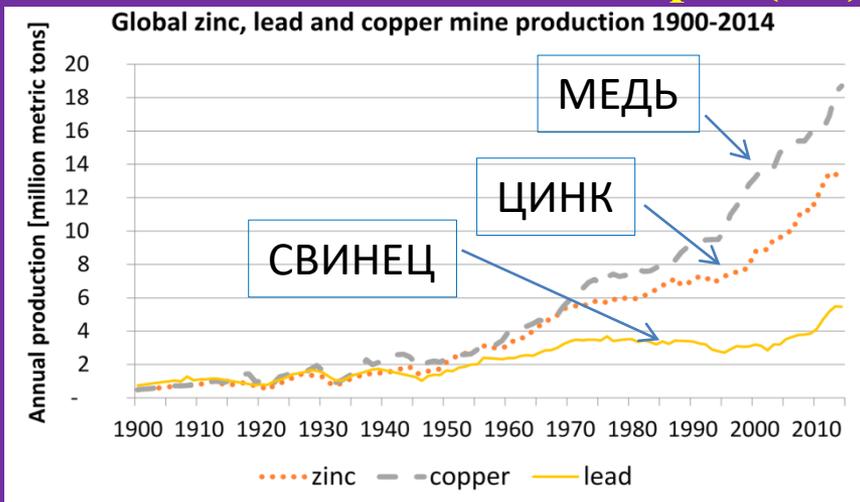
USGS, 2017

КРИТИЧЕСКИЕ РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ: ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

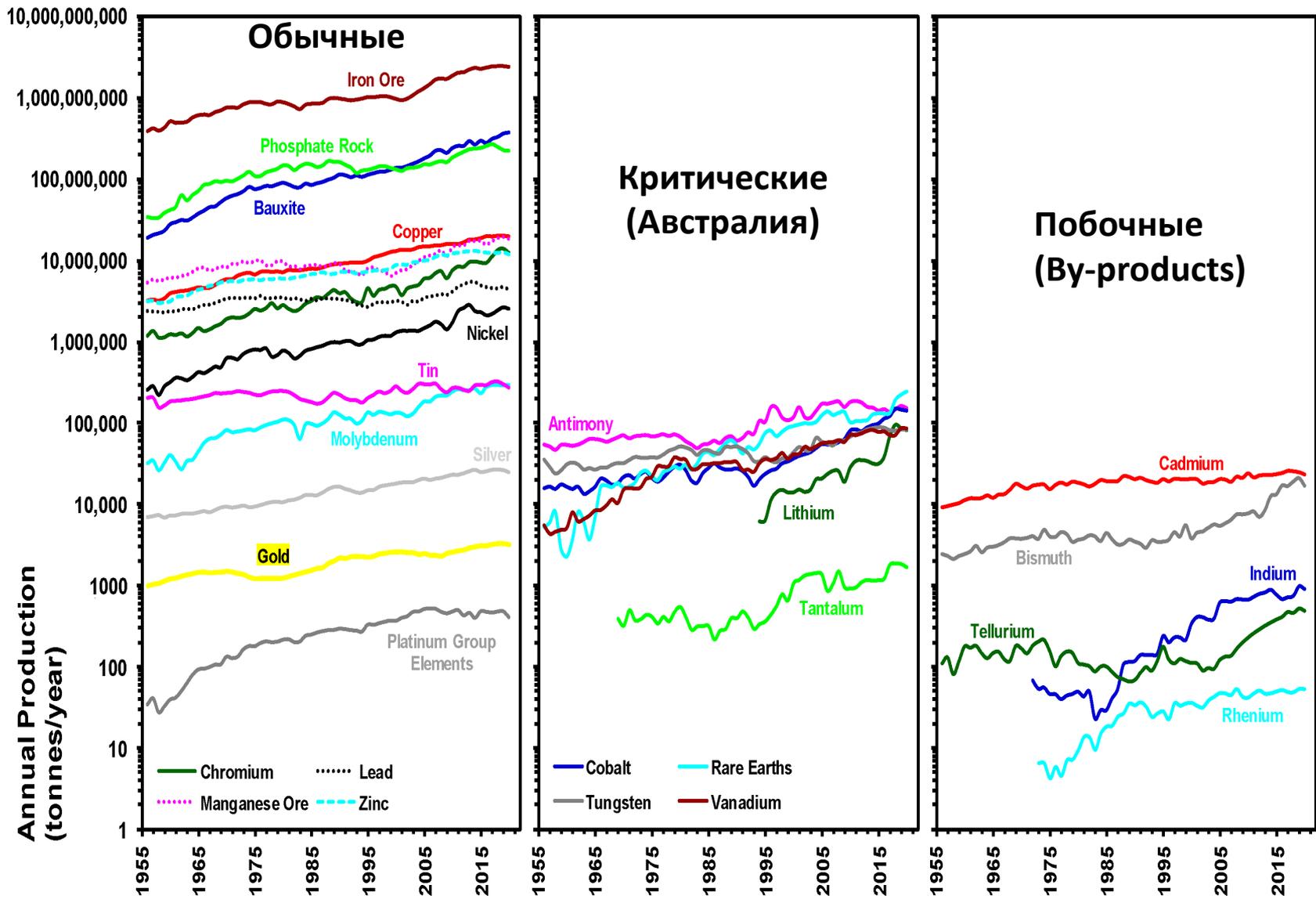
Применение	Критические металлы (группы)																	
	Висмут	Кобальт	Галлий	Германий	Золото	Индий	Иридий	Литий	Палладий	Платина	Редкие Земли	Рений	Селен	Родий	Рутений	Серебро	Тантал	Теллур
Фармацевтические препараты	■						■			■					■			
Медицина / стоматология		■			■	■		■	■	■		■	■			■	■	■
Жаропрочные сплавы															■		■	■
Магниты		■											■					■
Твердые сплавы		■															■	■
Другие сплавы						■												■
Металлургия ^а	■							■										
Стекло, керамика, пигменты ^б		■				■			■					■	■	■		■
Фотоэлементы			■		■													■
Батареи		■				■		■			■					■		■
Топливные элементы									■	■					■			■
Катализаторы		■		■		■		■	■	■	■	■	■	■	■	■		■
Ядерное производство								■			■							■
Припой	■															■		■
Электроника		■	■	■		■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Опто-электроника			■	■		■			■	■	■	■	■	■	■	■		■
Смазки			■					■										■

^а Добавки, например, плавка, гальваническое покрытие ^б Включает слои оксида индия и олова (ITO) на стекле

АПЕТИТЫ ОБЩЕСТВА ПОТРЕБЛЕНИЯ РАСТУТ: ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛОВ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ВДВОЕ КАЖДЫЕ 20-25 ЛЕТ, ЕЖЕГОДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО ПОВЫСИЛОСЬ С 21% (Sn) ДО 2800% ИЛИ В 29 РАЗ (Ga) С 1973 ПО 2015 ГГ



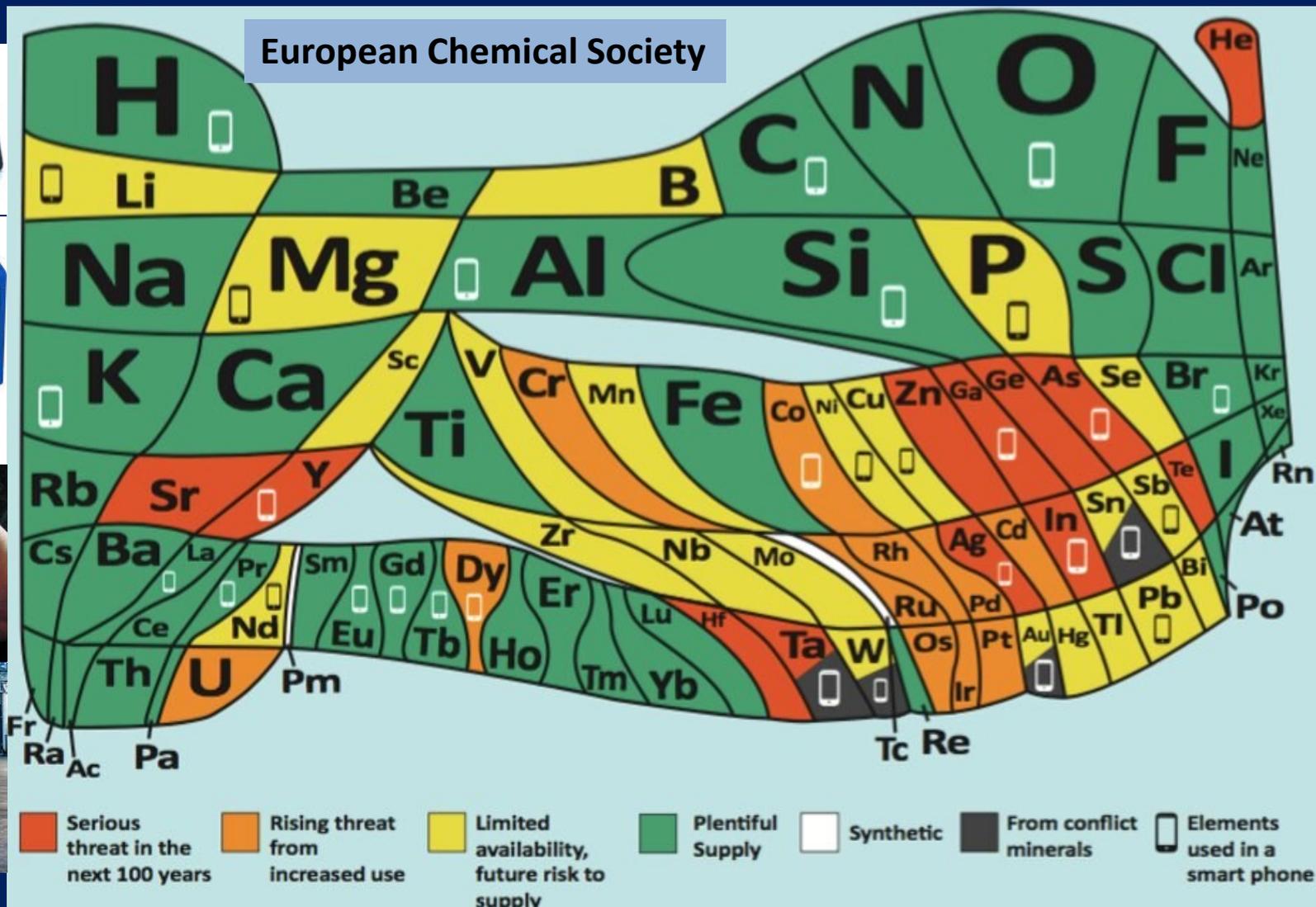
ПРОИЗВОДСТВО МЕТАЛЛОВ В МИРЕ (1955 -2020 гг)



90 природных элементов, из которых сделано, то чем мы пользуемся ежедневно

Каковы их запасы? Достаточно ли их в недрах Земли?

2019 - Международный год Периодической системы Д.И. Менделеева

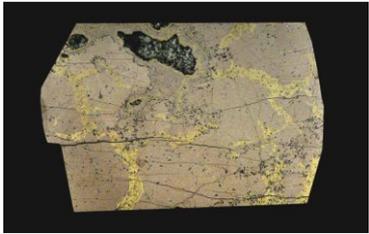


Поставки 44 элементов станут рискованными!

12 из них: He, Ga, Zn, Ge, As, Sr, Y, Hf, In, Ag, Te, Ta – уже в эти 100 лет!!!

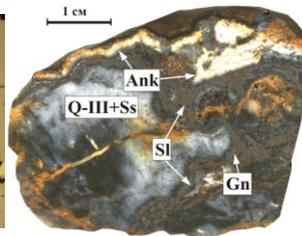
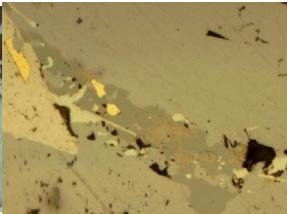
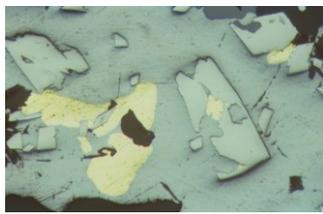
ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РОССИИ ЗАПАСАМИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ

На длительную перспективу (более 15 лет)



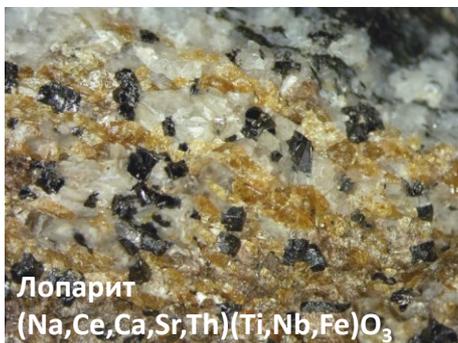
Медь, никель, олово, вольфрам, молибден, тантал, ниобий,
кобальт, скандий, германий, платиноиды, железо

На 10-15 лет



Свинец, сурьма,
золото, серебро,
алмазы, цинк

Дефицитные металлы



Лопарит
(Na,Ce,Ca,Sr,Th)(Ti,Nb,Fe)O₃

Уран, марганец, хром, титан, алюминий,
цирконий, бериллий, литий, рений,
редкие земли иттриевой группы

ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РОССИИ ЗАПАСАМИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ

НЕ ПРИВЕДЕНЫ СВЕДЕНИЯ О ЗАПАСАХ:

галлия, селена, теллура, ванадия, редких земель
цериевой группы, висмута, кадмия

**ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ
ВСТРЕЧАЮТСЯ В ПРИРОДЕ**

В ВИДЕ СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛОВ

**В ВИДЕ СОБСТВЕННЫХ МИНЕРАЛОВ И
ЭЛЕМЕНТОВ-ПРИМЕСЕЙ В ДРУГИХ МИНЕРАЛАХ**

**В ДРУГИХ МИНЕРАЛАХ В ВИДЕ ЭЛЕМЕНТОВ-
ПРИМЕСЕЙ ТОЛЬКО**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАПАСОВ ДВУХ ГРУПП НЕДОСТОВЕРНЫ
ТРЕБУЮТ СПЕЦИАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПОДСЧЕТА И АНАЛИЗА
ПРОБЛЕМЫ ПРИ ДОБЫЧЕ И ИЗВЛЕЧЕНИИ**



Берилл
alamy.com



Колумбит
crystalclassic.co.uk



Молибденит
sandatlas.org

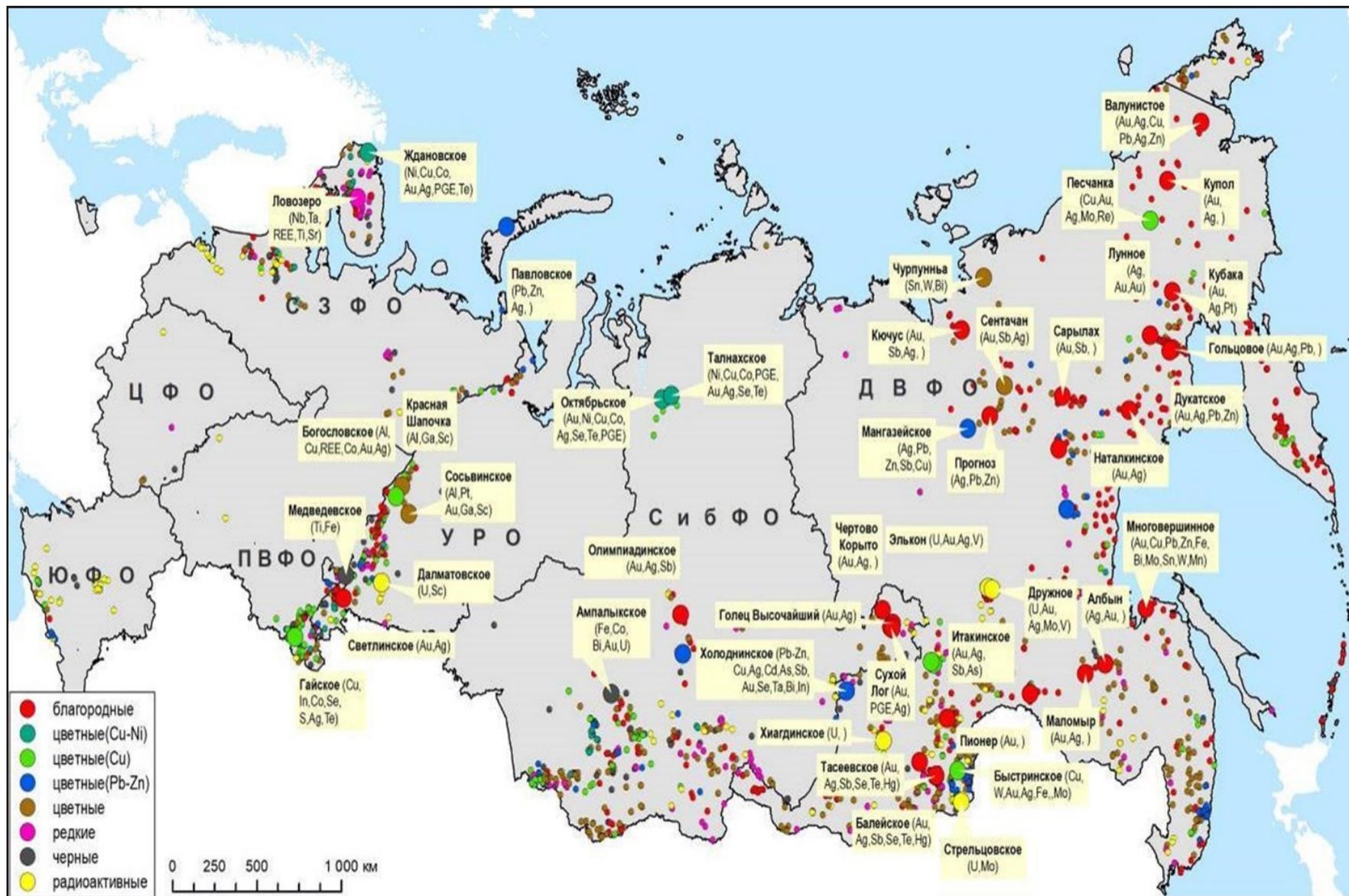


сфалерит
© geology.com



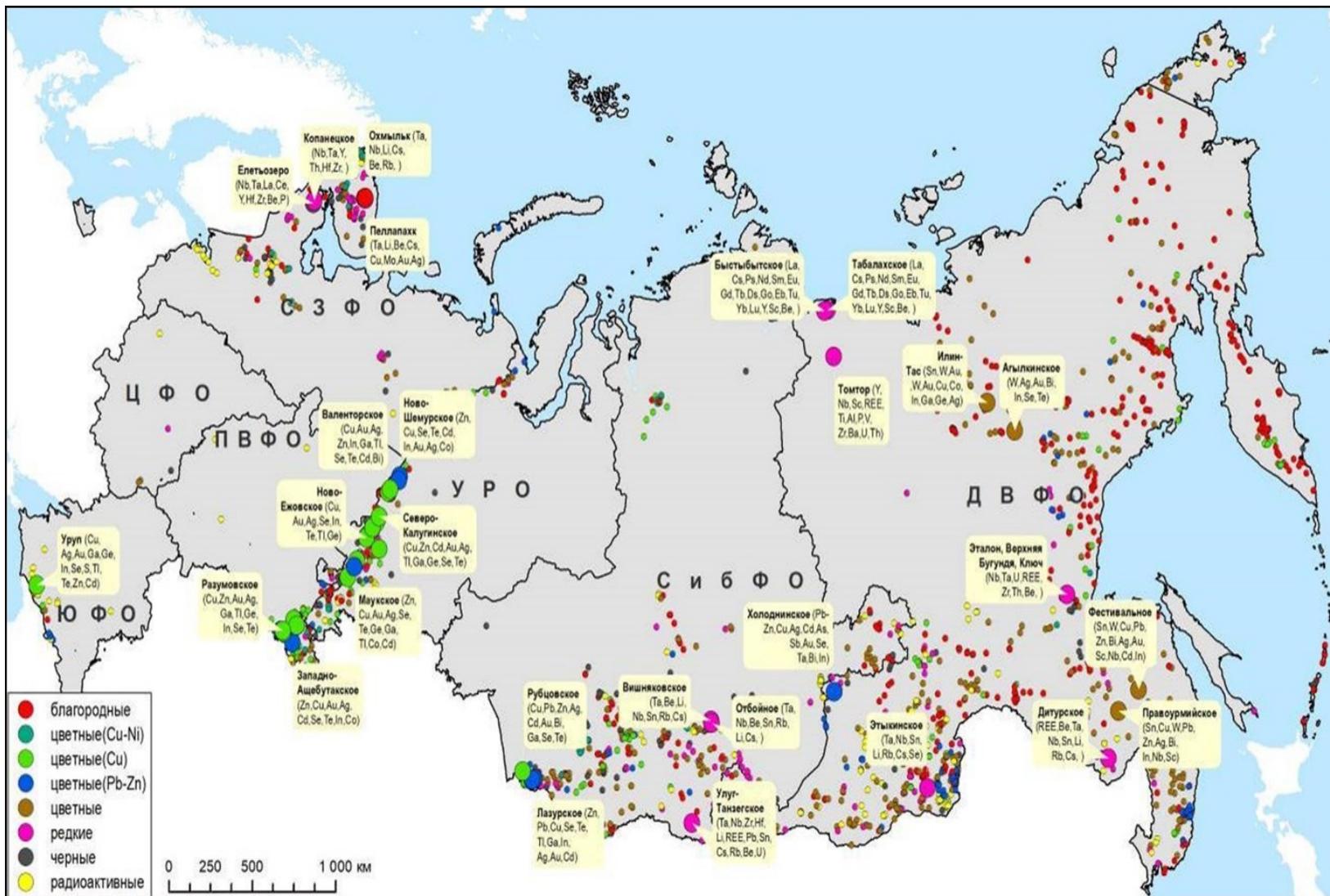
apatite

Месторождения стратегических металлов РФ



Крупные значки крупные месторождения, мелкие – мелкие и средние.

Месторождения высокотехнологичных металлов РФ



ОБЕСПЕЧЕННОСТЬ РОССИИ ЗАПАСАМИ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ

Россия обеспечена Fe, Cu, Ni, Sn, W, Mo, Ta, Nb, Co, Ge, PGE
при нынешних темпах добычи и потребления
в ближайшие годы возникнет дефицит Pb, Zn, Sb, Au, Ag,
преодолим с решением технологических, экономических и политических проблем

Дефицит стратегических металлов: Cr, Mn, Ti, Zr(Hf), REE, Ta, Nb, Be, U, Al, вызван низким качеством балансовых руд

Преодолим внедрением рациональных технологических схем обогащения и технологического передела



Отсутствуют данные о высокотехнологичных металлах Ga, In, Re, Cd, Te, Se, Ge, Hf, REE, Tl,

Необходима переоценка осваиваемых и вовлекаемых месторождений

Прогноз МЭР на 50 лет с учетом роста потребления железной руды – в 2,5 раза, производство меди – в 1,5–2, а потребление в 5 раз, никеля – в 1,6–1,8 (производство) и 2,7–3 раза – потребление, цинка – в 2,2–2,4 раза, других видов минерального сырья в 1,5–2 раза. (ниже темпов роста в развитых странах) вызывает риск в неспособности обеспечения имеющимися запасами, требует их значительного прироста



**КАК РЕШАТЬ ПРОБЛЕМЫ МСБ?
открытие новых месторождений и
нетрадиционных типов полезных
ископаемых и вовлечение известных**



**совершенствование технологий
обогащения и извлечения металлов**



**«рециклинг» - повторное использование
металлов**

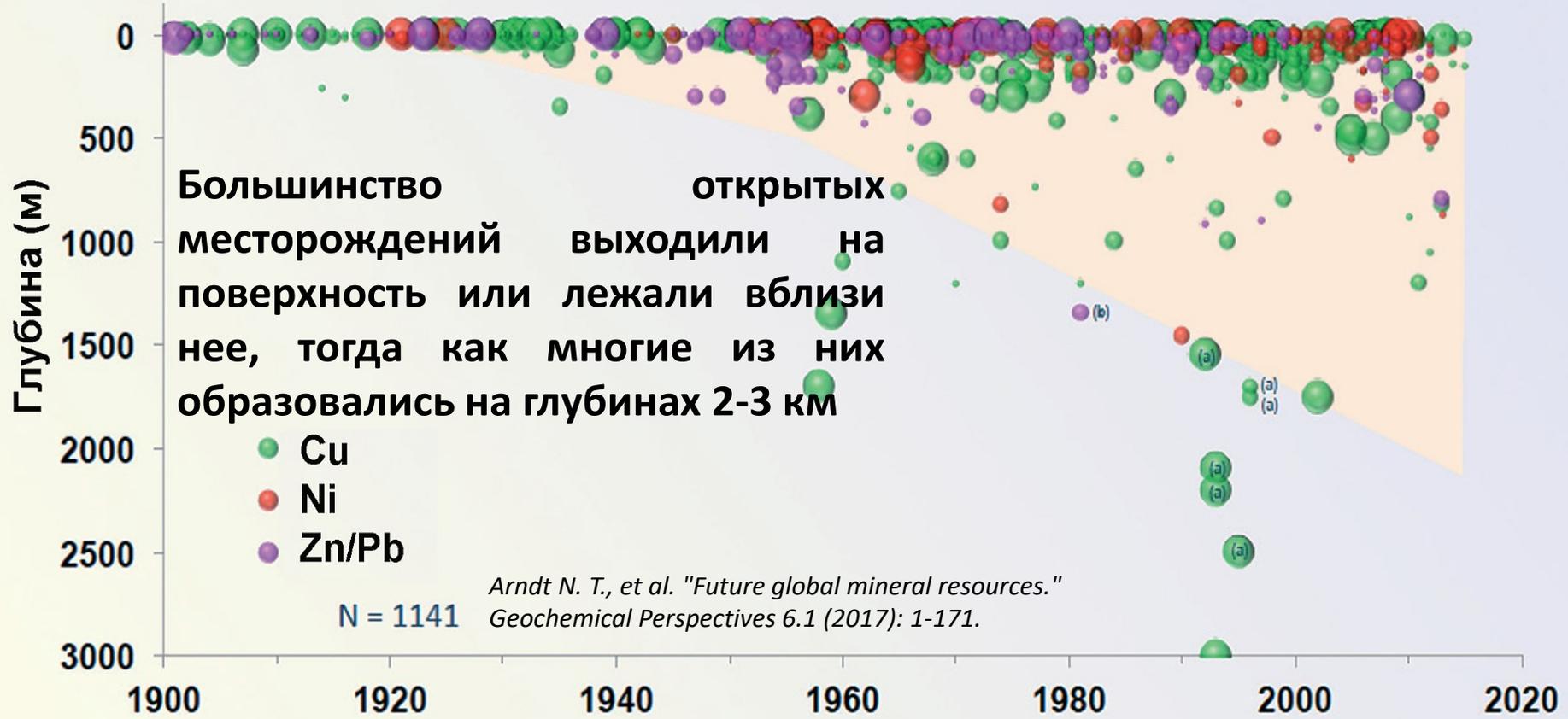


**извлечение металлов из «техногенных
месторождений» скоплений
«забалансовых» руд и хвостов
переработки богатых руд**

МНОЖЕСТВО МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРЕДСТОИТ ОТКРЫТЬ!

Недра Земли содержат большие объемы минеральных ресурсов, чем принято считать, и пик добычи металлов будет достигнут в отдаленном будущем

ДИНАМИКА ОТКРЫТИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ (1900-2018 гг.)



Размер кружков соответствует размеру месторождений (средние, крупные и гигантские)

Озерное колчеданно-полиметаллическое месторождение

Открыто в 1961 г. Детальная разведка закончена в 1969 г. Балансовые запасы (ГКЗ СССР в 1970 г) на 01.01.2021 составляют: 135,1 млн. т руды, цинка – 8268,4 тыс. т (среднее содержание – 6,16 %), свинца – 1563,3 тыс. т (среднее содержание – 1,17 %), серы пиритной – 27 239,0 тыс. т (среднее содержание – 20,4 %), серебра – 4670,6 т (среднее содержание – 35,0 г/т), кадмия – 21 312,5 т (среднее содержание – 0,016 %).

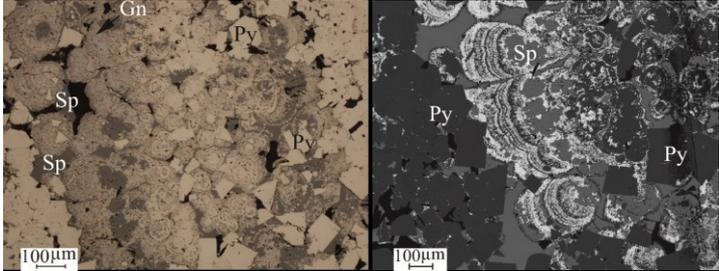
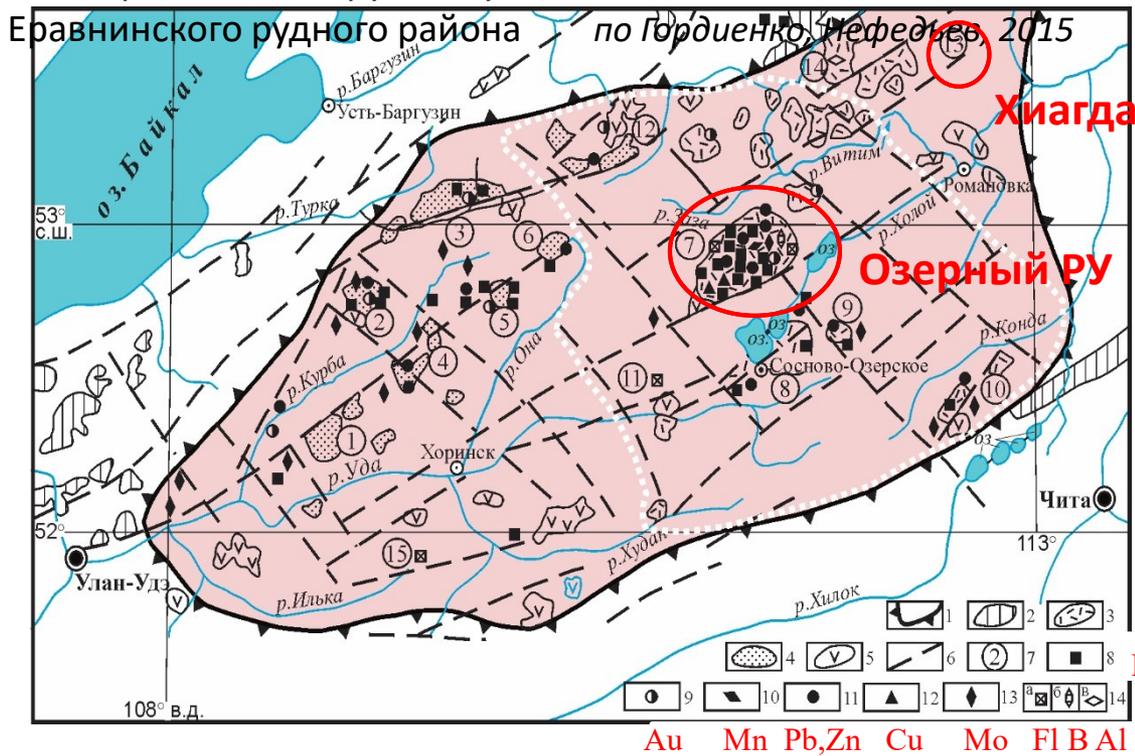


Схема размещения рудных узлов и полезных ископаемых



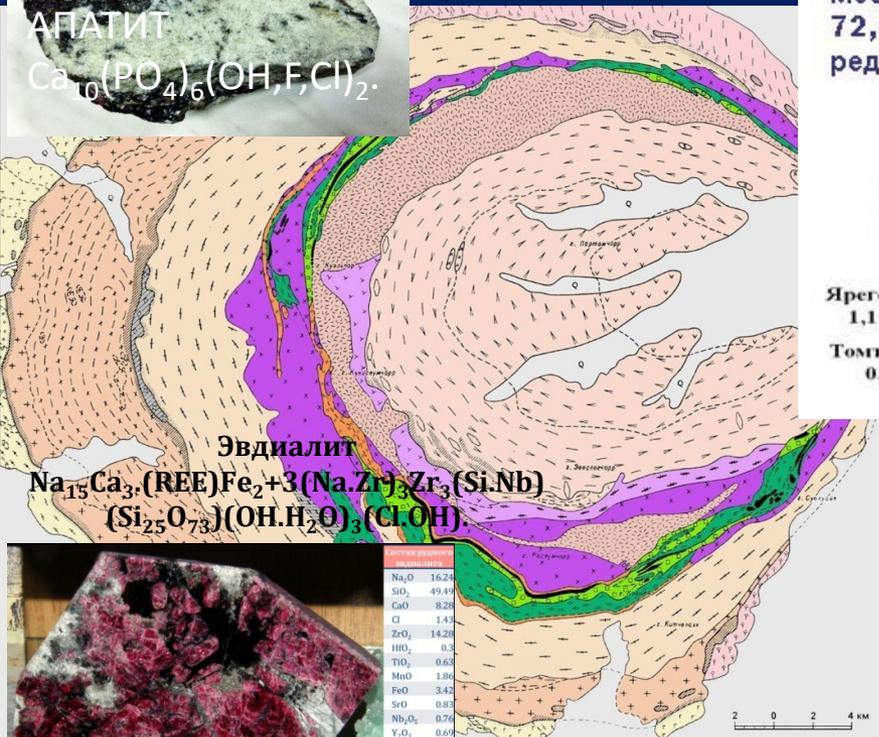
Запасы 23,5 млн. т (2-е место в мире после Австралии или 13 %). 1 370 (10 %) тыс т Австралия и 275 тыс т (2 %) РФ
 Запасы In оцененные ~97.3 т

Фото И. В. Викентьева (ИГЕМ РАН)

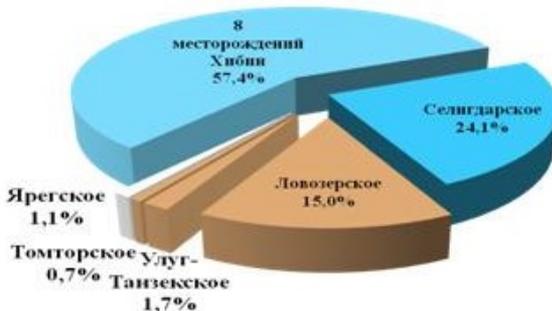
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ



АПАТИТ
 $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})_2$



Месторождения Кольского региона - 72,4% балансовых запасов редкоземельных металлов России.



Лопарит
 $(\text{Na}, \text{Ce}, \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Th})(\text{Ti}, \text{Nb}, \text{Fe})\text{O}_3$



Лопаритовый концентрат 9.5 тыс. т
Продукты РЗМ 2.7 тыс.



Эвдиалит
 $\text{Na}_{15}\text{Ca}_3(\text{REE})\text{Fe}_2+3(\text{Na}, \text{Zr})_3\text{Zr}_3(\text{Si}, \text{Nb})(\text{Si}_{25}\text{O}_{73})(\text{OH}, \text{H}_2\text{O})_3(\text{Cl}, \text{OH})$

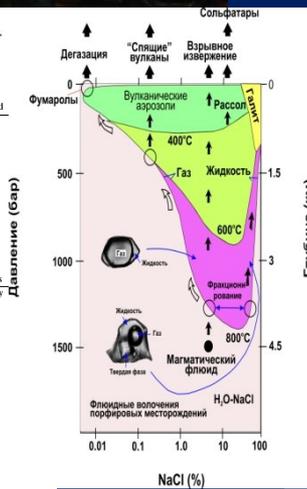
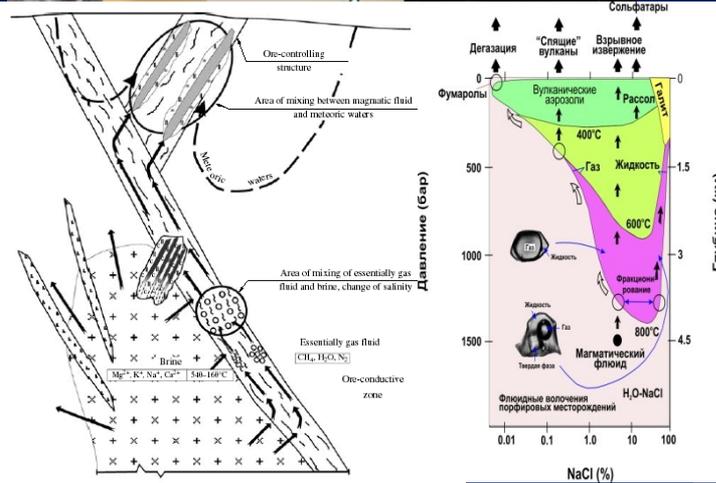
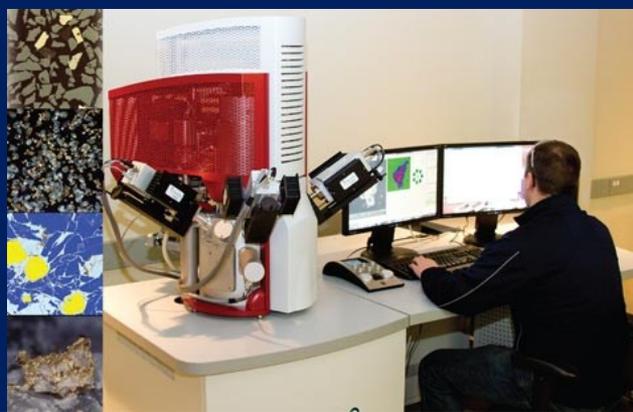
Оксид	Содержание (%)
Na ₂ O	16,24
SiO ₂	49,44
CaO	8,21
Cl	1,43
ZrO ₂	14,28
HfO ₂	0,3
TiO ₂	0,63
MnO	1,86
FeO	3,42
SrO	0,83
Nb ₂ O ₅	0,74
Y ₂ O ₃	0,69
La ₂ O ₃	0,36
Ce ₂ O ₃	0,71
Nd ₂ O ₃	0,43
Сумма	99,71
O=Cl ₂	0,36
Сумма	99,35

Более 10 млн. т. (40%) запасов РЗМ РФ в апатит-нефелиновых рудах месторождений Хибинской группы

Добыто 108,9 тыс. т РЗМ, но не извлечено!!!

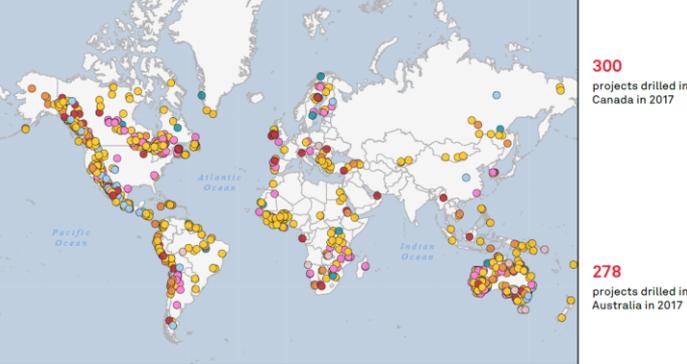
В 2019 г. было добыто: в РФ в –111.6 тыс. т., по USGS - Китай – 140 тыс. т (2020 г.), в мире 240 тыс. т

Как фундаментальная наука МОЖЕТ способствовать развитию минерально-сырьевой базы?



Прогноз и поиски рудных месторождений и учение о рудных месторождениях: ГДЕ и КАК ЖЕ эти ветви могут соединиться?

Global drilling activity in 2017
(1,060 projects)



300
projects drilled in
Canada in 2017

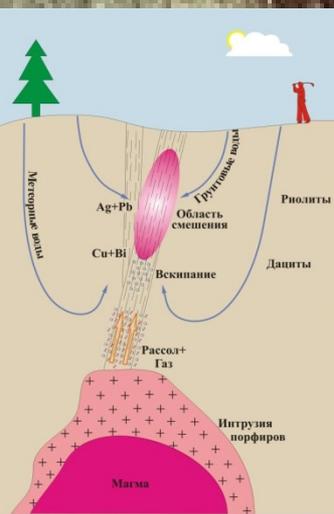
278
projects drilled in
Australia in 2017

Primary commodity
Copper Gold Lead-Zinc Minor Base Metals Nickel PGM Silver Specialty Metals

Data as of January 31, 2018.
Source: S&P Global Market Intelligence
S&P Global Market Intelligence

Различия в целях геологоразведочных работ и фундаментальных исследований очевидны

Геологоразведочные работы требуют ответа на вопрос,
ГДЕ расположено месторождение и рудные тела
и КАК их можно обнаружить



Академические исследования сфокусированы

на генетических вопросах, их цель понять, **КАК** образовалось месторождение

ОТКРЫТИЕ НОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

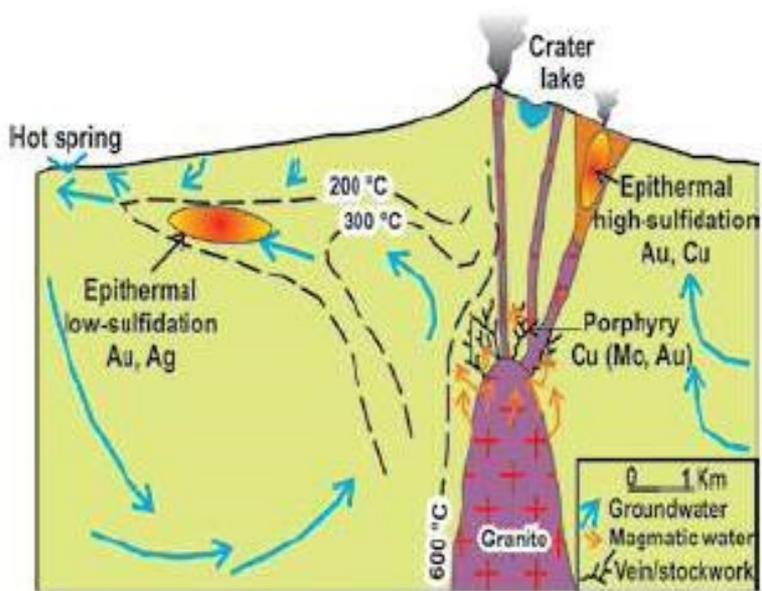
Выбор перспективной провинции – критический, наиболее ответственный шаг в стратегическом планировании, направленном на открытие месторождений

Решение, связанное с выбором провинции, порождает колоссальные риски и возможные финансовые потери, если на прогнозных территориях не будут выявлены крупные месторождения полезных ископаемых

При этом надо понимать, какие из наблюдаемых геологических, петрологических, минералогических и геохимических характеристик отражают те процессы, которые привели к образованию того или иного месторождения или металлогенических провинций

**РАЗРАБОТКА ГЕНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ-
НЕОБХОДИМОЕ ЗВЕНО СТРАТЕГИИ
ПРОГНОЗА И ПОИСКОВ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРРИТОРИЙ И
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

МОДЕЛЬ МИНЕРАЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



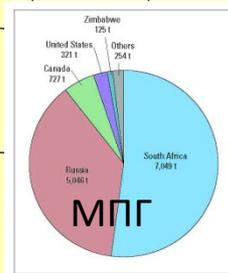
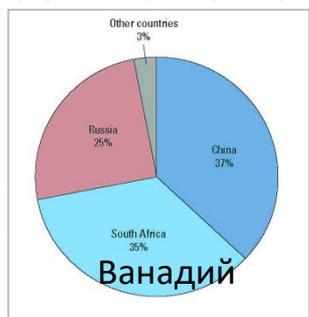
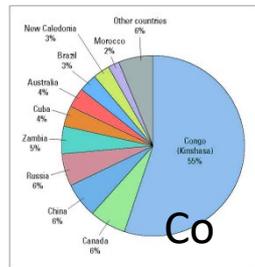
В науках о Земле термин "модель" используется как образ, представляющий физическую копию объекта (например, изображение в масштабе рудных тел и горных выработок в шахте) до единой концепции, которая описывает и объясняет сложное геологическое явление (например, строение, последовательность и физико-химические параметры образования месторождения)

Модель может быть эмпирической (описательный), она содержит те характеристики, которые считаются типичными для группы месторождений, даже если соотношения этих характеристик не известны; или теоретической (генетической), в которой характеристики взаимосвязаны через некоторое фундаментальное явления

«Идеальная» модель минерального месторождения должна содержать скорее не характеристики какого-то одного конкретного месторождения, а только те специфические параметры, которые свойственны и другим месторождениям.

Рудообразующие системы

Магматическая ультрабазитовая (Ni-Cu- коматитовый, Ni-Cu, PGE и Fe-V-Ti в



Главные металлы: Ni, Cu, Co, PGE, Fe, V, Ti
 Сопутствующие металлы:
Au, Ag, Te, Se, U, Th, Zr, REE

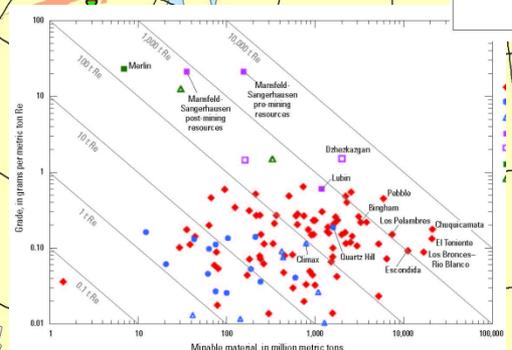
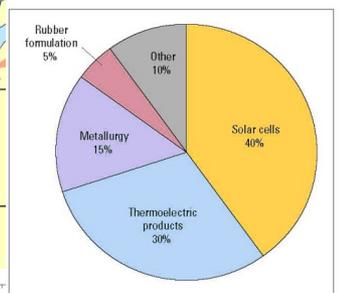
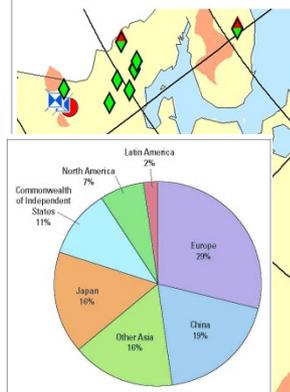
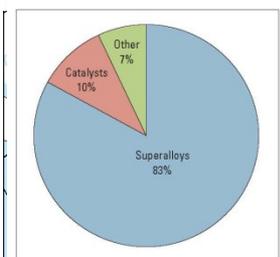
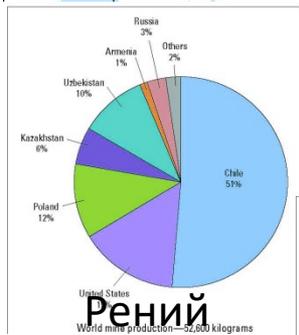
- ареалы базит-ультрабазитовых интрузий
- Рудная формация**
- медные-никелевые платиноносные**
- платиноносная нерасчлененная
- медно-никелевая в расслоенных интрузиях платиноносная
- никель-кобальт-золото (серебро)-висмут-урановая
- медно-титан-ванадиевая мафитовая

- черные**
- ильменит-магнетитовая
- титановая нерасчлененная
- ванадий-титан-железородная ультрамафит-мафитовая
- базитовая титаномагнетит-ильменит-ванадиевая
- титаномагнетитовая магматическая в основных породах.
- офиолитовая хромитовая

*Бортников и др., 2016
с дополнениями*

Рудообразующие системы

Порфирово-эпитемальные (Cu-Mo-Au порфировый, эпитемальный низко- и высокосульфидизированный, скарновый)



ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Главные металлы: Cu, Mo, Au, Ag
Сопутствующие металлы: Re, Sb, Pt, Pd, Pb, Zn, Te, In, Se, Bi, Cd, W, B, REE

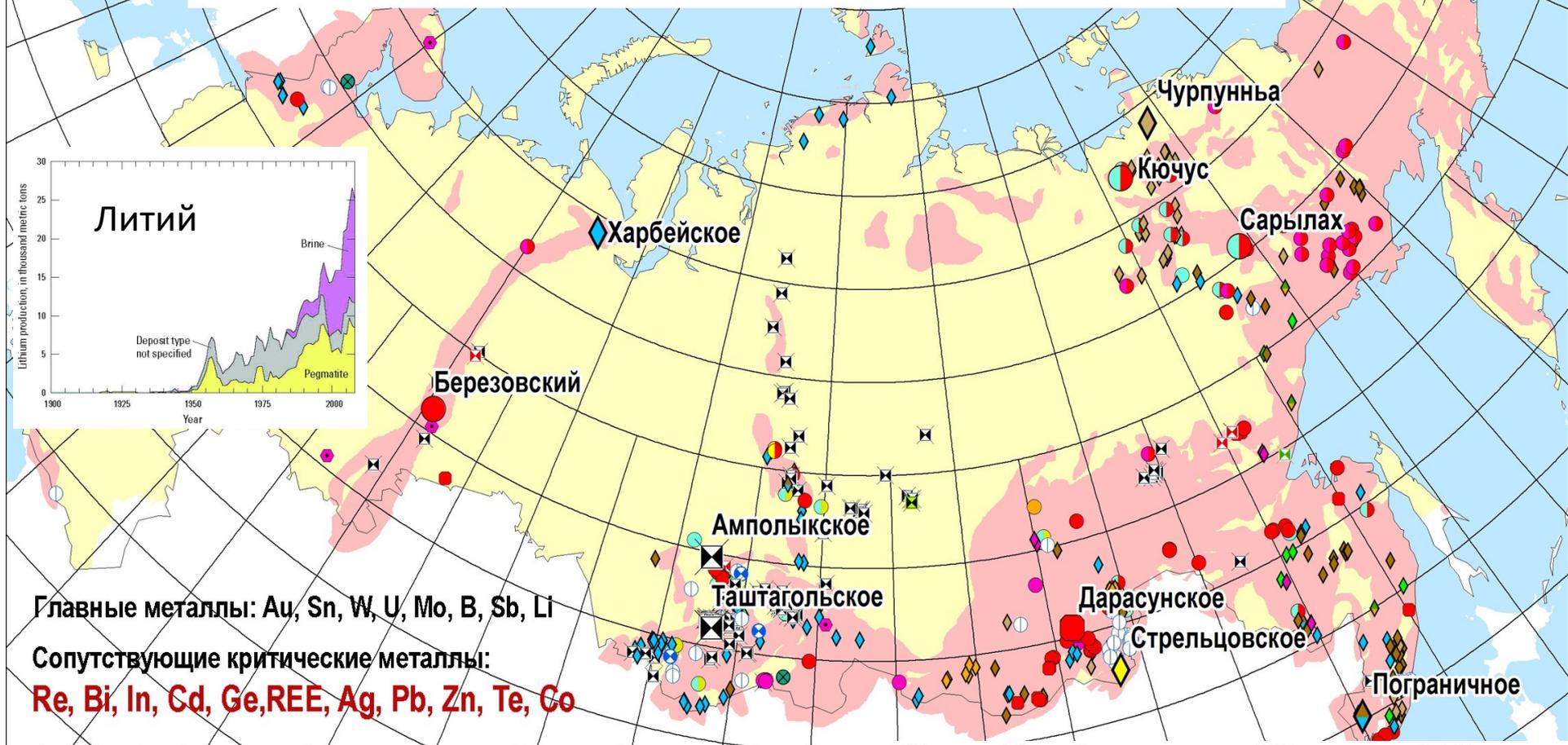


Мультиареалы интрузий		Рудная формация	
	Мультиареалы интрузий		золото-скарновая
	железорудная магнизоферритовая скарновая		золото-сульфидная
	золото-кварцевая жильная		золото-сульфидно-кварцевая (жил и минерализованных зон)
	золото-порфировая		золоторудная джаспероидная
	золото-редкометалльная		золоторудная малосульфидная
	золото-серебряная		магнетитовая скарновая
	медно-молибден-порфировая золотосодержащая		медно-молибден-порфировая
	медно-порфировая		медно-порфировая золотосодержащая
	медно-порфировая золотосодержащая		медно-скарновая
	свинцово-цинковая скарновая		скарново-полиметаллическая
	скарново-полиметаллическая		сурьмяно-ртутная эпитеральная
	сурьмяно-ртутная эпитеральная		

Бортников и др., 2016
 с дополнениями

Рудообразующие системы

Орогенная, связанная с интрузивами гранитоидов (Au-Bi, Sn-W, Mo-порфировый, пегматитовый (REE), U, скарновый)



Главные металлы: Au, Sn, W, U, Mo, B, Sb, Li

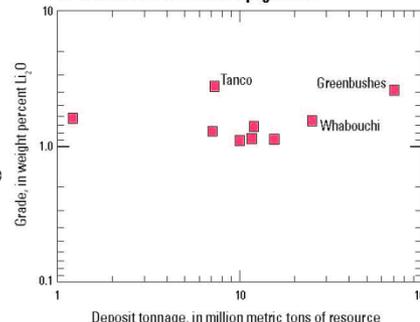
Сопутствующие критические металлы:

Re, Bi, In, Cd, Ge, REE, Ag, Pb, Zn, Te, Co

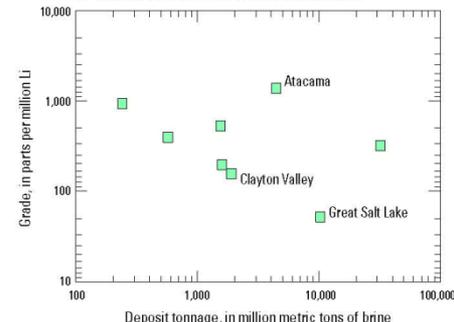
- ареалы ТМА
- Рудная формация благородные**
- золото-сульфидно-кварцевая (жил и минерализованных зон)
- золото-кварцевая жильная
- золото-скарновая
- золоторудная джаспероидная
- золото-редкометалльная
- золото-сурьмяная
- золото-урановая
- свинцово-цинковая скарновая
- вольфрам-молибденовая скарновая
- железорудная магниоферритовая скарновая
- железорудная скарново-магнетитовая
- жильные**
- никель-кобальт-золото (серебро)-висмут-урановая
- свинцово-цинковая жильная в карбонатных породах
- свинцово-цинковая жильная
- сурьмяно-ртутная джаспероидная
- порфировые**
- медно-молибден-порфировая
- медно-молибден-порфировая золотосодержащая

Вортников и др., 2016
с дополнениями

A. Lithium resources in LCT pegmatites

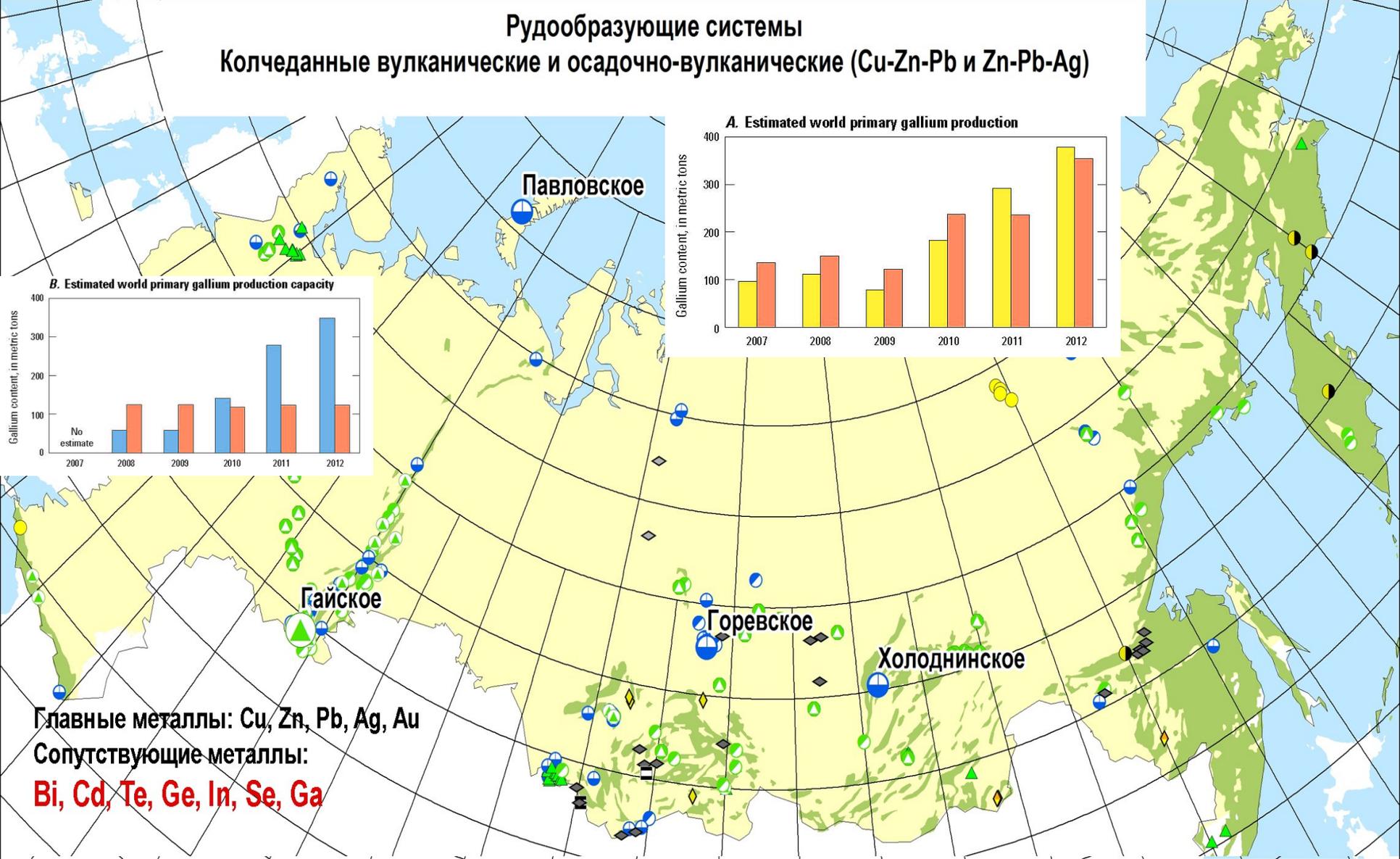


B. Lithium resources in closed-basin brines



Рудообразующие системы

Колчеданные вулканические и осадочно-вулканические (Cu-Zn-Pb и Zn-Pb-Ag)



Островодужные вулканические пояса, зоны рифтогенеза

Рудная формация

медные

- медно-колчеданная и медно-цинковая колчеданная
- колчеданно-полиметаллическая в вулканогенных породах
- медно-свинцово-цинковая колчеданная в осадочно-вулканогенных породах
- медно-колчеданная в осадочных породах

свинцово-цинковые

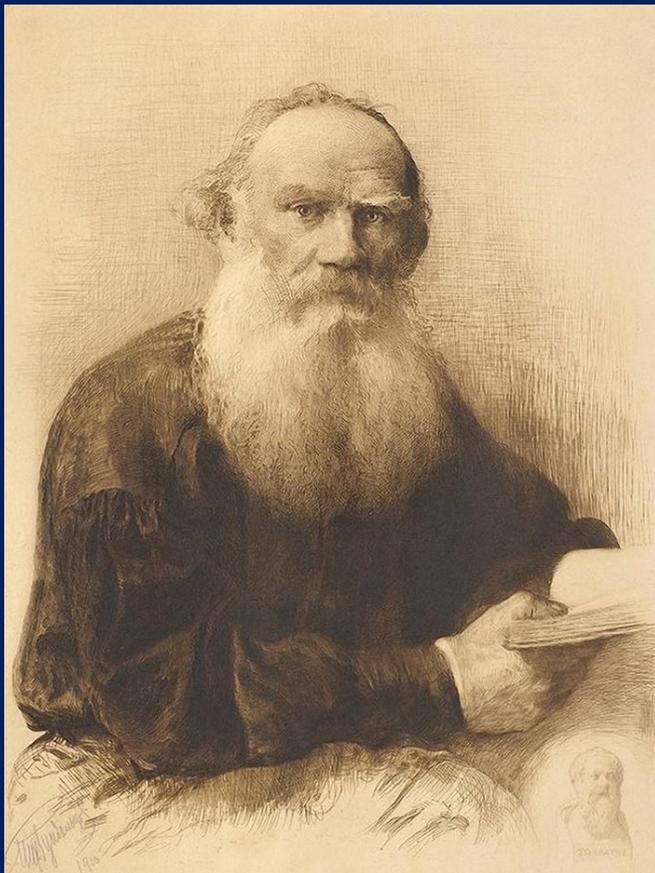
- колчеданно-полиметаллическая в терригенных породах
- свинцово-цинковая вулканогенно-карбонатная стратиформная

черные

- магнетит-гематитовая в вулканогенно-осадочных
- железорудная магнетитовая вулканогенная

цветные

- молибден-урановый жильно-штокверковый в вулканитах
- ртутная вулканогенная
- ртутная кварц-дикитовая
- ртутная терригенная аргиллизитовая



**Для человеческого ума
недоступна совокупность
причин явлений. Но
потребность отыскивать
причины вложена в душу
человека. И человеческий ум,
не вникнувши в
бесчисленность и сложность
условий явлений,**

**из которых каждое отдельно может
представляться причиною, хватается за первое,
самое понятное сближение и говорит: ВОТ
причина.**

Лев Толстой «Война и мир», т. IV, ч. 2