



ПЕРМСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Классика будущего



МИНЕРАЛЬНАЯ КАРБОНИЗАЦИЯ - ОСНОВНОЙ ПУТЬ ДЕПОНИРОВАНИЯ СО И СО₂ ИЗ АТМОСФЕРЫ В ТВЕРДУЮ УСТОЙЧИВУЮ ФАЗУ. ПЕРСПЕКТИВЫ ПЕРМСКОГО КРАЯ

Наумов В.А.^{1,2}

*¹Естественнонаучный институт Пермского государственного
национального исследовательского университета, Пермь, Россия*

*²Пермский государственный национальный исследовательский
университет, Пермь, Россия: naumov@psu.ru*

Пермь, март 2022 г.

1. ПРИРОДНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ КАРБОНИЗАЦИЯ ПОРОДЫ, ОСУЩЕСТВЛЯЮЩИЕ УДАЛЕНИЕ И ХРАНЕНИЕ $\text{CO} + \text{CO}_2$ в ЛИТОСФЕРЕ

Литосфера включает внешние слои твердых горных пород земли, и с 99,95% мирового общего углерода представляет собой самый большой резервуар углерода. Из-за низких скоростей потока, литосфера является частью долгосрочных циклов углерода.

Отложения и углеродсодержащие породы:

Карбонаты: кальцит CaCO_3 (+мел), доломит $\text{Ca, Mg} (\text{CO}_3)$
260 000 000 Гт, мрамор

Кероген (ископаемые органические вещества, например, в горючем сланце) 15 000 000 Гт С

Газовые гидраты 10 000 Гт С

Уголь, природный газ, нефть 4100 Гт С

Педосфера с гумусом, торфом, отложениями, минералами 1500 Гт

Графит

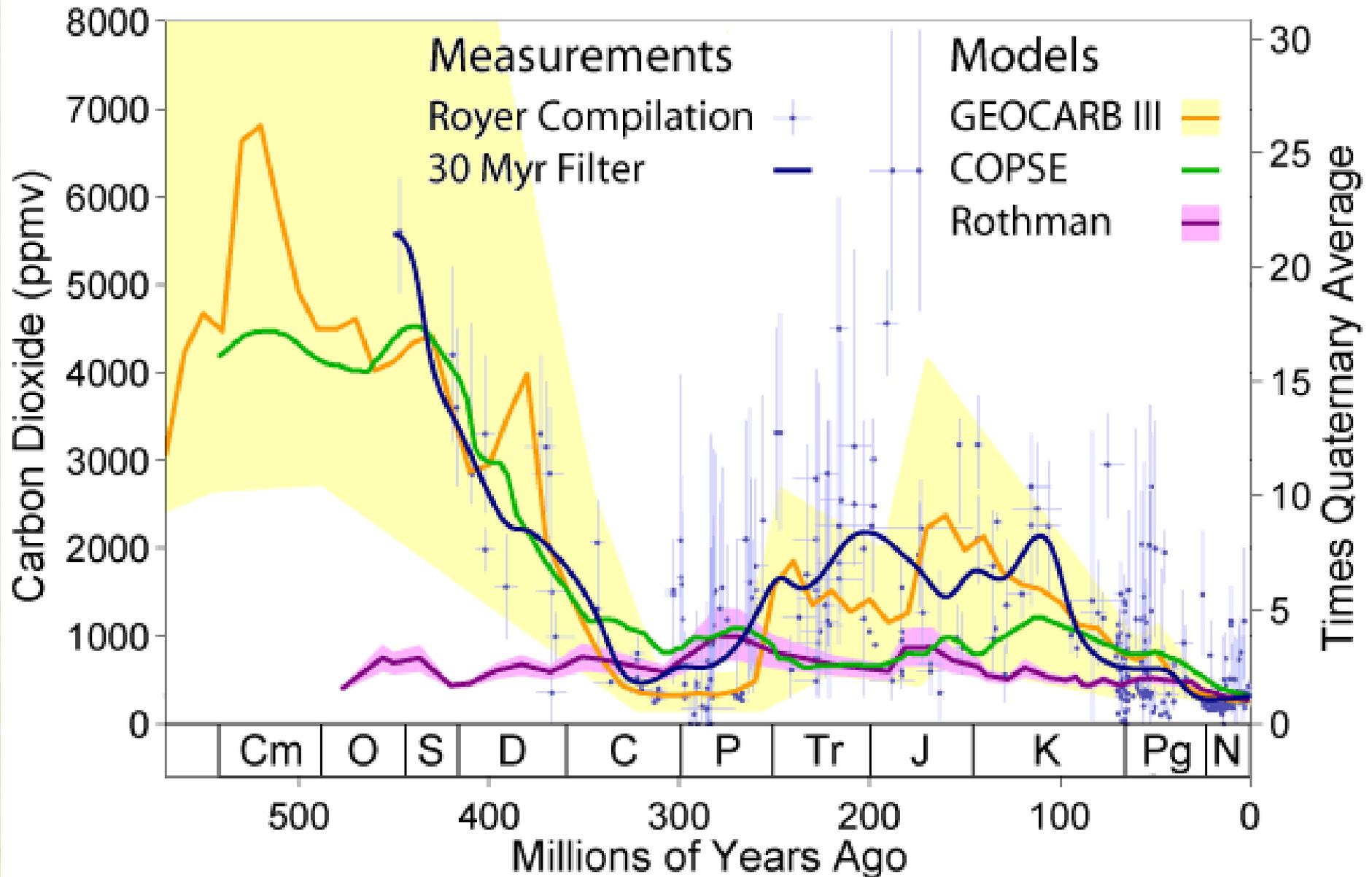
Амаз и фуллерены

Твердые каустобиолиты био- и хемогенной природы



Оценка изменения концентрации углекислого газа в фанерозое.
Данные измерений и моделирования

Phanerozoic Carbon Dioxide



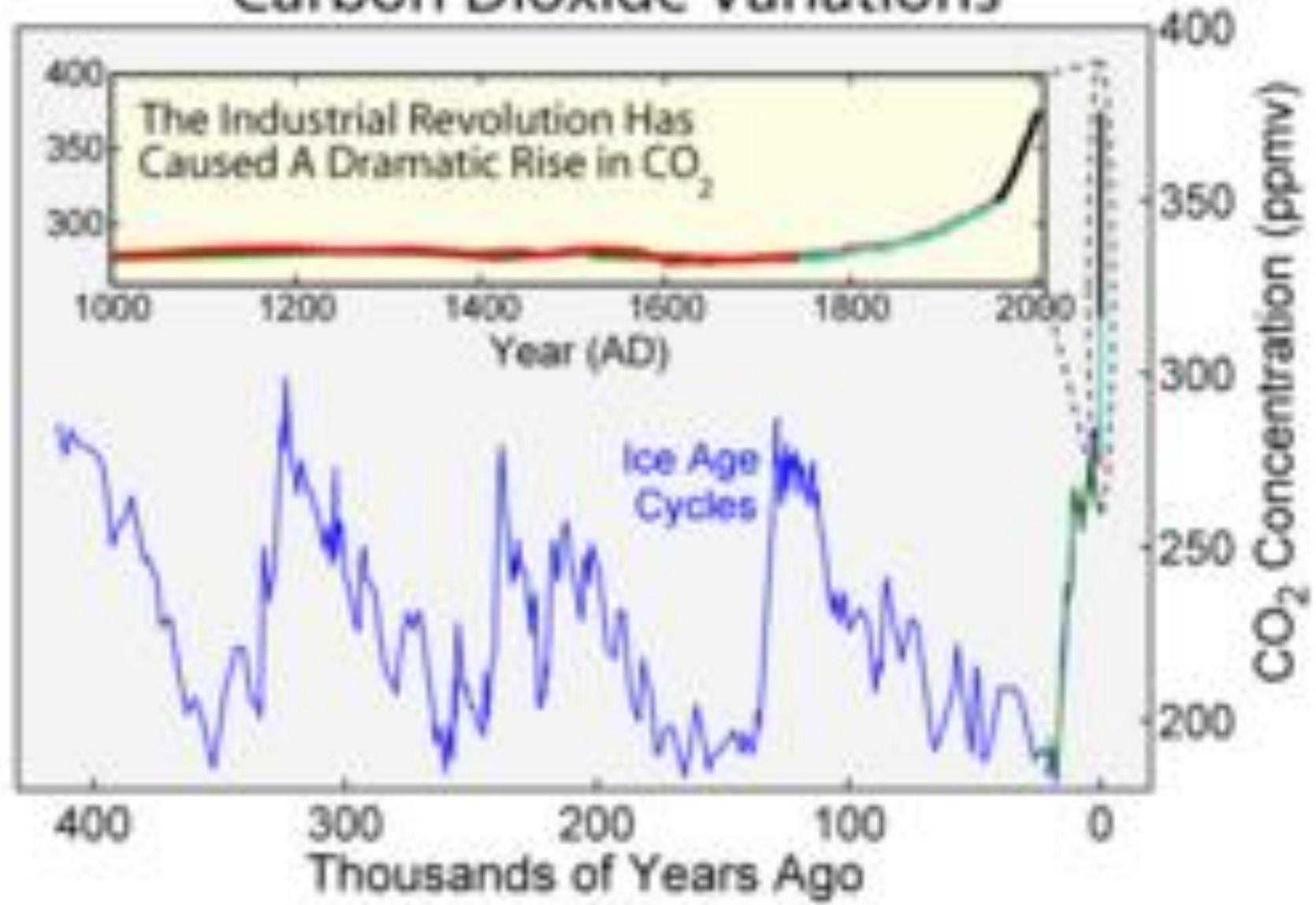
<https://deru.abcdef.wiki/wiki/kohlenstoffzyklus>

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:User:Dragons_flight

Общая схема этапности движения углерода

1. Максимальное содержание углекислоты в атмосфере фиксировалась в период извержения вулканов.
2. Периоды максимального извержения вулканов связаны с господством суши - геократии.
3. Вслед за длительными извержениями и поступлением твердых частиц в атмосферу наблюдались оледенения
4. Вслед за оледенением - происходило мощное накопление карбонатных толщ, каустобиолитов, депонирование парниковых газов путём хемо и биогенного преобразования вещества и формирования осадочных пород.

Carbon Dioxide Variations

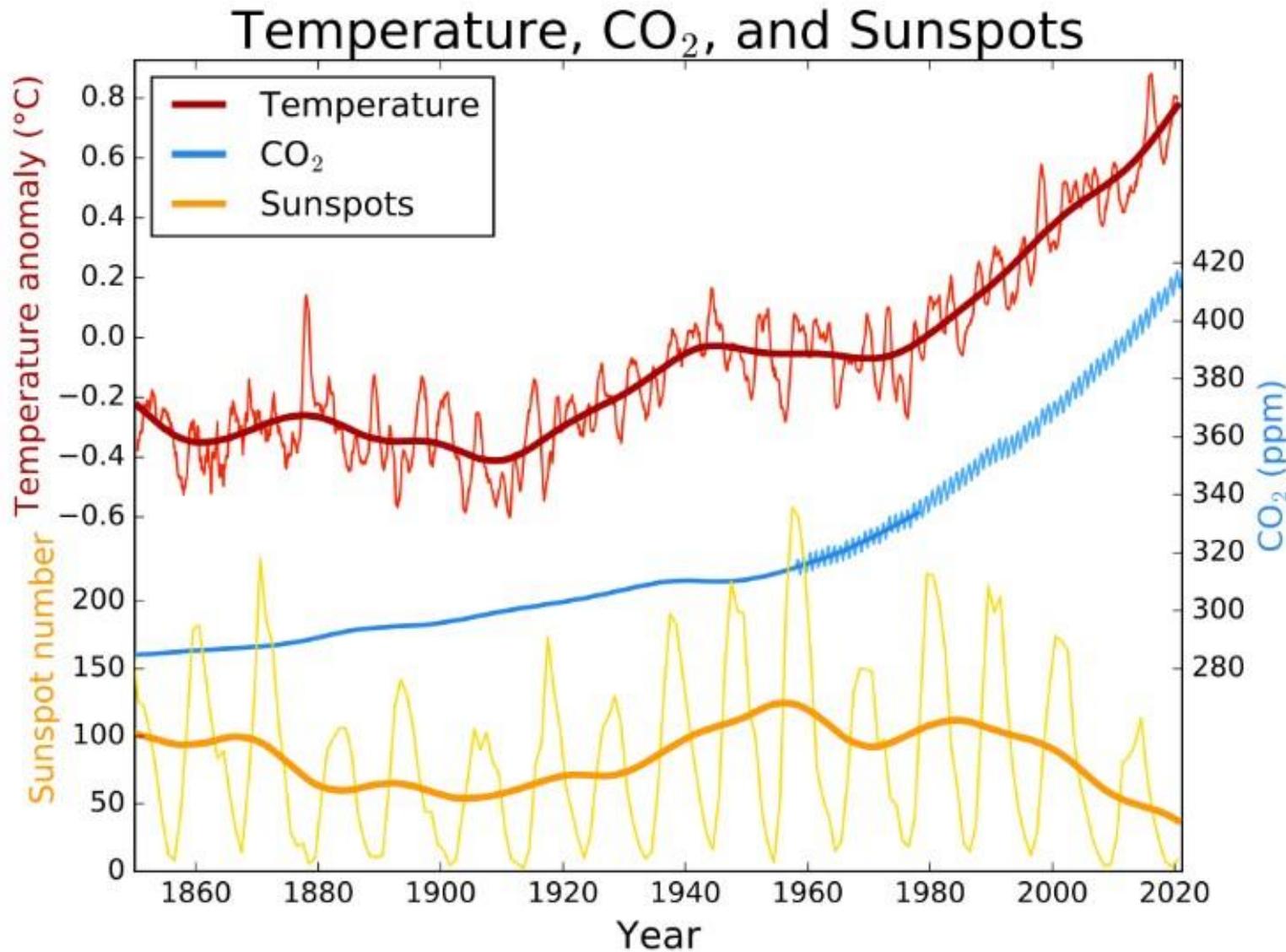


Концентрация CO₂ за последние 400 000 лет

https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:User:Dragons_flight

<https://deru.abcdef.wiki/wiki/kohlenstoffzyklus>

2. НЕУЧТЕННЫЕ ФАКТОРЫ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА и повышения температуры на поверхности Земли



ПРИРОДНАЯ И
ТЕХНОГЕОГЕН-
НАЯ
ДЕСУЛЬФИДИ-
ЗАЦИЯ
ОСАДКОВ
(РАЗЛОЖЕНИЕ
СУЛЬФИДОВ)

Увеличение объемной концентрации CO₂ [ppm] в атмосфере и средней температуры поверхности. Выбросы CO₂ во всем мире от использования ископаемого топлива, производства цемента и сжигания в факелах

Сульфиды в природных условиях. Промораживание и оттаивание



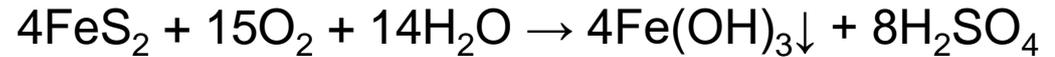
Россыпная золотоносность косвенно отражает процессы преобразования вещества в экзогенных условиях: осаждение металла из растворов и формирование повышенных концентраций (Чукотка, 2019).

Экзогенные условия :

Промораживание сульфидов

Кислая среда

Разрушающее действие кислорода и воды:



Осаждение золота на геохимических барьерах



«ржавые» реки, фото В.Н. Голдырева

РАЗЛОЖЕНИЕ СУЛЬФИДОВ
ВТОРИЧНЫЕ ПРИЗНАКИ СУЛЬФИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ базальтов
на Большом Курейском водопаде, плато Путорана (2017)



выражены как продукты разложения сульфидов железа в виде кристаллогидратов сульфатного железа (розенит, смольнокит, мелантерит, кокимбит)

СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ базальтов на плато Путорана (2017)



кристаллогидраты сульфатного железа (розенит, смольнокит, мелантерит, кокимбит) в изменении состава воды в пределах эрозионных (эвразийских) котлов

ВЫДЕЛЕНИЯ КРИСТАЛЛОГИДРАТОВ ЖЕЛЕЗА НА БАЗАЛЬТАХ И ОБЛОМКАХ АЛЛЮВИЯ



(остров Итуруп, Курилы, 2016)

Сульфиды в природных условиях.

Сульфатные воды вулканов

13



Продукты разложения и преобразования сульфидов в водах вулканических систем острова Итуруп (Курилы, 2016); оксиды и гидроксиды железа, сернокислые воды



Устойчивые продукты разложения сульфидов железа (пирита и марказита) гидроксиды железа (гетит и гидрогетит и производные самородной серы)

Подобные кристаллогидраты сульфатного железа (далее кристаллогидраты) были получены нами экспериментально и доказаны как кристаллогидраты в опытах по промораживанию и оттаиванию сульфидов.

Ранее они были отмечены нами на многих объектах сульфидной минерализации как первичный продукт разложения сульфидов, особенно на участках сезонного оттаивания в зоне развития многолетнемерзлых пород.

Кристаллогидраты и другие продукты разложения сульфидов неустойчивы в экзогенных условиях. При попадании в воду окрашивают ее в бурый цвет и окисляются до гидроксидов.

Одной из устойчивых фаз разложения сульфидов железа (пирита и марказита) являются гидроксиды железа в виде минералов гетита и гидрогетита и производные самородной серы.

Разложение сульфидов в техногенных отвалах КРИСТАЛЛОГИДРАТЫ СУЛЬФАТОВ ЖЕЛЕЗА на отвалах сульфидного месторождения (Хакассия, 2016)

15



Кристаллогидраты сульфатов железа (ИСПАРЕНИЕ) после сливов шахтных вод, Квинсленд, Австралия



на глинах по вулканитам



<https://www.australianresourcesandinvestment.com.au/2021/10/27/implications-of-climate-change-on-mine-water-quality>

Разложение сульфидов в техногенных отвалах отработанных россыпей золота в Якутии и Магаданской области (КРИОГЕНЕЗ+УДАЛЕНИЕ ВОДЫ) 17



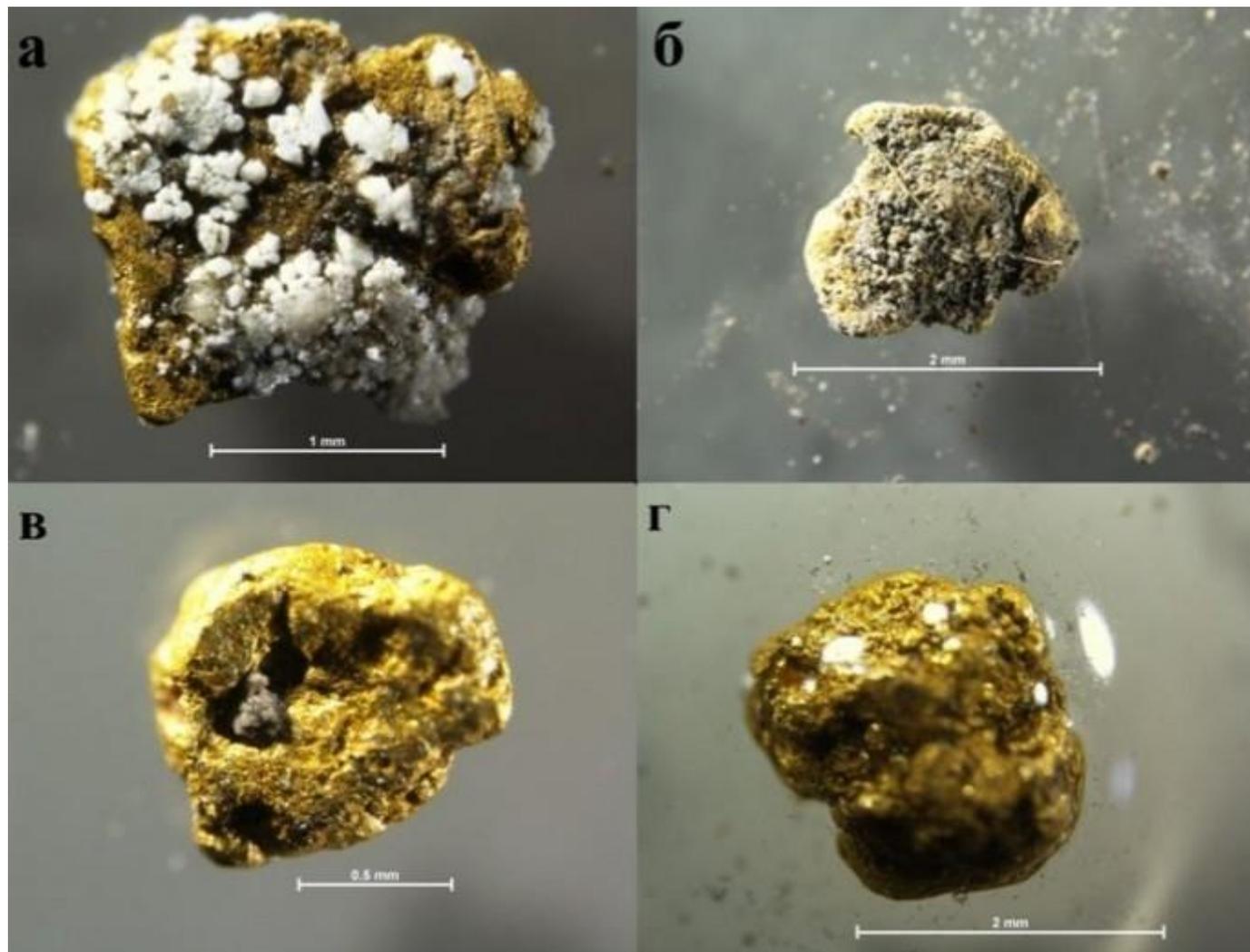
Белые налеты —
кислалогидраты
сульфатов
железа, продукты
разрушения
сульфидов:

а - бассейн р. Колыма,
участок Кудрявый (фото
Р.Ф. Фахрутдинова, 2021);

б - д — Сусуманский
район, бассейн р. Нера
участок Нера-Мекчерга
(фото Т.В. Кислицына,
2021)

Система «пирит, золото – вода – воздух» . Взаимодействие образца с водой при комнатной температуре.

После испарения воды, при окислительном разложении пирита в слабокислом растворе образуется белый осадок розенита $\text{Fe}[\text{SO}_4] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.



Частицы золота служат подложкой, на которой кристаллизуются сульфаты, образуя скорлупу-пленку толщиной 2,0-3,0 мм. На частицы золота оседают мелкие частицы сульфидов и других сульфатов железа.

Фото А.Ш. Хусаиновой

Золотоносные фазы: а – розенит после естественного испарения воды; б – железистая пленка после стадии нагревания; в – частицы сульфида в западинах золотины после стадии заморозки; г – золотины в капле воды

Гидрооксиды железа на участках самоизлива кислых вод ¹⁹ на Кизеловском угольном месторождении (уголь, пирит-марказит, Ср. Урал)



Материалы лаб. ГТП ЕНИ ПГНИУ, Н.Г. Максимович, 2019

Сернокислые реки Левихинского рудника (медные руды, халькопирит, Ср. Урал)



Как примеры
**ПРИРОДНОЙ
ГИДРОМЕТАЛЛУРГИИ**



Процесс очистки воды в Лёвихе



Промышленно значимое гидроминеральное сырье $\text{Cu}+\text{Zn}+\text{Mn}+\text{Fe}+\dots+\text{Ag}+\text{Au}$

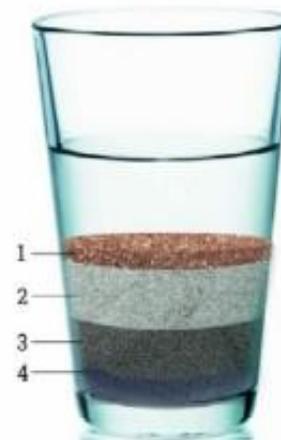
**ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ
НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ВОД - ПОЛУМЕРА**



Нейтрализация вод «известковым молочком» $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Содержание некоторых химических веществ в шахтной воде

До очистки



1. Медь – 17 мг/л
2. Цинк – 175 мг/л
3. Железо – 1226 мг/л
4. Марганец – 63 мг/л

После очистки



1. Медь – 3 мг/л (-67%)
2. Цинк – 85,23 мг/л (-51,3%)
3. Железо – 61,30 мг/л (-95%)
4. Марганец – 35 мг/л (-45%)

По данным директора ФГКУСО «УралМонацит»
Сергей Зобнева

3. ТЕХНОМИНЕРАЛЬНАЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ. ТЕХНОГЕННО-МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ (ТМО)



ТЕХНОСФЕРНАЯ РЕВОЛЮЦИЯ.

Минеральные образования

Техносферная революция — коренные изменения в геологической истории Земли, связанные с формированием новой оболочки — техносферы, которая отличается спецификой строения и состава; обусловлена технической деятельностью человека, «вооруженного» техникой и преобразованиями возникших ТМО.

Масса Земли	—	6×10^{21} тонн
Масса земной коры*	—	$2,8 \times 10^{19}$ тонн
Масса гидросферы**	—	2×10^{18} тонн
Масса техносферы***	—	3×10^{13} тонн
Масса биосферы****	—	$2,4-3,6 \times 10^{12}$ тонн
Масса людей*****	—	5.5×10^7 тонн

* - из них 21 % — океаническая кора и 79 % — континентальная; или 0,473 % общей массы Земли;

** - в Мировом океане - 67%, в литосфере — 30%, в материковых льдах и подземных водах — 2%, а в водоемах суши — 1%;

*** - по Заласевичу и др., 2016 (*The Anthropocene Review*, 28.11.2016; doi: 10.1177/2053019616677743);

**** - биосфера в сухой массе;

***** - по данным на 2000 г.

Техносфера на 60 – 90 % представлена горной массой, отработанных месторождений и перемещенных пород (не менее 6 тератонн)

4. ПЕРМСКИЙ КРАЙ. ТЕХНОМИНЕРАЛЬНАЯ ДЕКАРБОНИЗАЦИЯ. «Белые моря» АОЗТ «Березниковский содовый завод»





Фото Т. Боровых

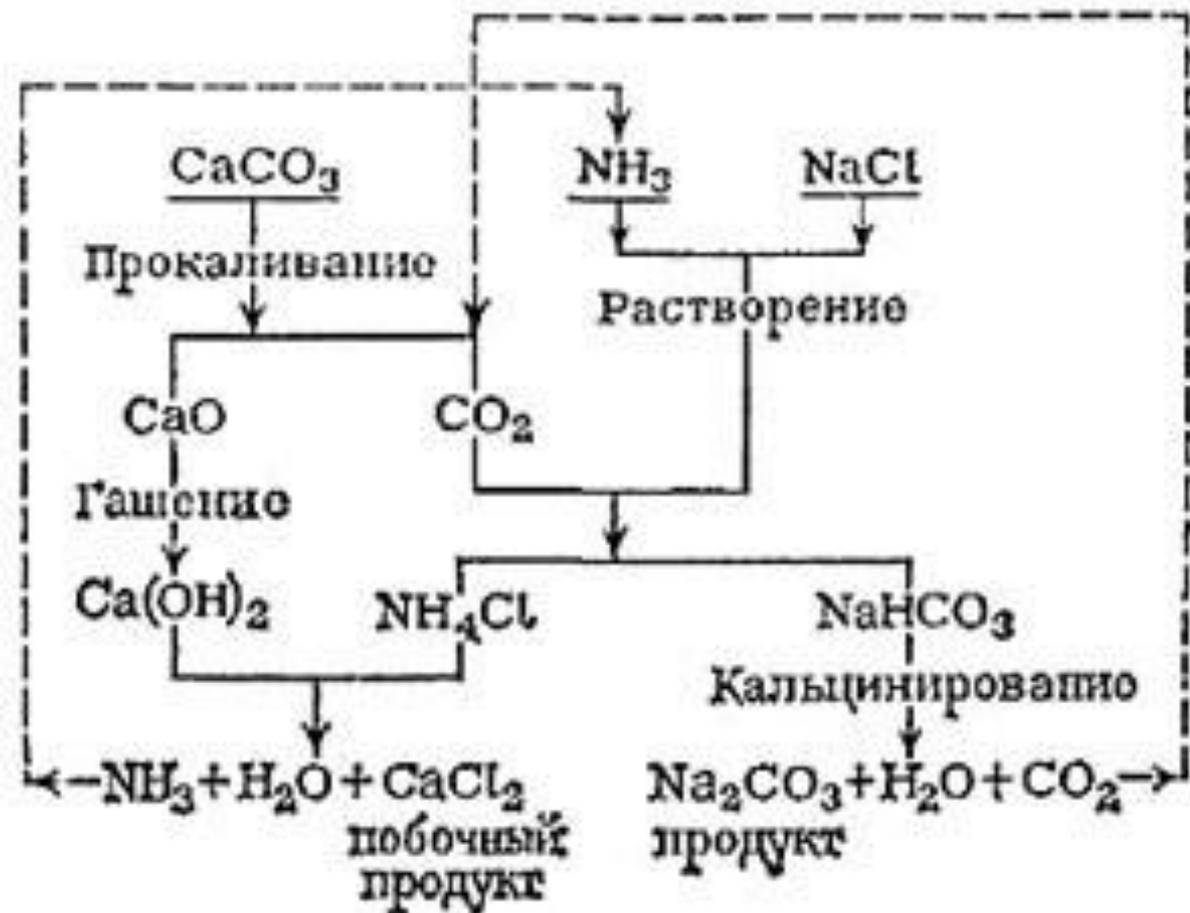
**«БЕЛЫЕ МОРЯ»
Березниковского
содового завода,
общий вид**



Фото Н.Г. Максимовича

технологии удаления и хранения углекислоты

Аммиачный способ получения кальцинированной соды



При производстве NaCl_2 образуется CaCl_2 (основная часть отходов). В шламонакопители поступает пульпа (жидкая фаза 98 %). Состав пульпы (мг/л): хлоридов – 106360; сульфатов – 7200; кальция – 41100; натрия и калия – 25860; аммония – 200; pH – 12,3; минерализация – 179 г/л

Состав отвалов: кристаллический кальцит - до 58 %; скрытокристаллический кальцит - до 70 %. Общее количество в пределах 79 – 97 % (наибольшее содержание в верхнем слое мощностью 1 – 1,5 м). Другие карбонаты: арагонит – 1-2 % и доломит – до 1 %, гидроксид кальция (Блинов и др., 2004; Боков, Блинов, 2009)

Вопрос: Откуда берется кальцит, в растворе хлорид кальция?

Ответ: $\text{CO} + \text{CO}_2$ - депонируется из атмосферы.
Процесс химического удаления и хранения углекислоты (УХУ)

В шламохранилище ОАО «БСЗ» накоплено более **10** млн.м³ кальцита (на 2008 г.).

Из атмосферы удалено около **3** млн. м³ CO_2 или 150 млн. евро в расчете на «углеродные единицы» (2021 г. - 50 евро/т CO_2)

ПЕРМСКИЙ КРАЙ.

Химические технологии удаления и хранения углекислоты

2. Замещение сульфат иона на поверхности сульфатных вод (вода в пещерах) и образование кальцитной пленки

3. Кипячение сульфатной воды и образование кальцитовой накипи

4. Осаждение кальцита с кислыми шахтными водами (?)

Техносферные изменения климата, повышение температуры — следствия проявления техносферной революции в освоении минерального вещества

1. Оголение пространств от разработки месторождений
2. Вывод на поверхность осадков
3. Активизация процессов техногенеза (приспособления осадков к новым условиям среды:
 - интенсификация окисления
 - десульфидизация осадков, образование кристаллогидратов металлов
 - формирование простых оксидов и гидроксидов, с одной стороны, и появление кислот
4. Формирование новых минеральных соединений и агрегатов с цементом из преобразованного материала
5. Литосферное изменение состава осадков влияет на изменение состава гидро-, био- и атмосферы

Роль этих процессов не достаточно изучена и не учитывается в общей схеме глобального изменения климата, температурного баланса, изменения свойств окружающей среды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Необходимо оценить **техносферные изменения климата, повышение температуры** с позиций проявления техносферной революции в освоении минерального вещества
2. **Практика геологии ТМО: необходима разработка сценариев развития ситуаций**, их экономическая и экологическая оценка, разработка природоподобных технологий освоения твердой и жидкой фазы ТМО:
 - а) предотвращение причин**, ликвидация последствий изменения состава ТМО путем
 - отдельного выделения и складирования подверженных разложению минеральных соединений (сульфидов, арсенидов и др.);
 - целенаправленное усиление или замедление скорости разложения минеральных соединений;
 - создание системы управления факторами изменения состава ТМО)
 - б) управление формированием состава твердой, жидкой и газообразной фазы ТМО и формы нахождения золота** - создание локальных концентраций полезных компонентов (пород, минералов, химических элементов) с целью последующего их извлечения
3. Разработка предложений **по созданию карбонового полигона в Пермском крае** на основе использования хемогенного удаления и хранения углерода



Благодарю за внимание!



naumov@psu.ru