

# Глобальный цикл углерода в биосфере

Основы биогеохимии

Тема 8

Д.Ю. Шишкина

# Циклы массообмена элементов

Существует глубокая связь химического состава земной коры, Мирового океана и атмосферы. Эта связь обусловлена процессами массообмена между геосферами. Процессы изначально носили циклический характер по причине суточных, сезонных, годовых и др. колебаний поступавшей от Солнца энергии.

Источники поступления химических элементов в циклы массообмена:

- гипергенная мобилизация и выщелачивание из гранитного слоя континентальной коры;
- дегазация мантии, вынос вулканических газов.

Элементы, выделявшиеся в виде газов, образовали газовую оболочку, гидросферу и живое вещество. Углерод, кислород, сера, азот.

# Биогеохимические характеристики углерода

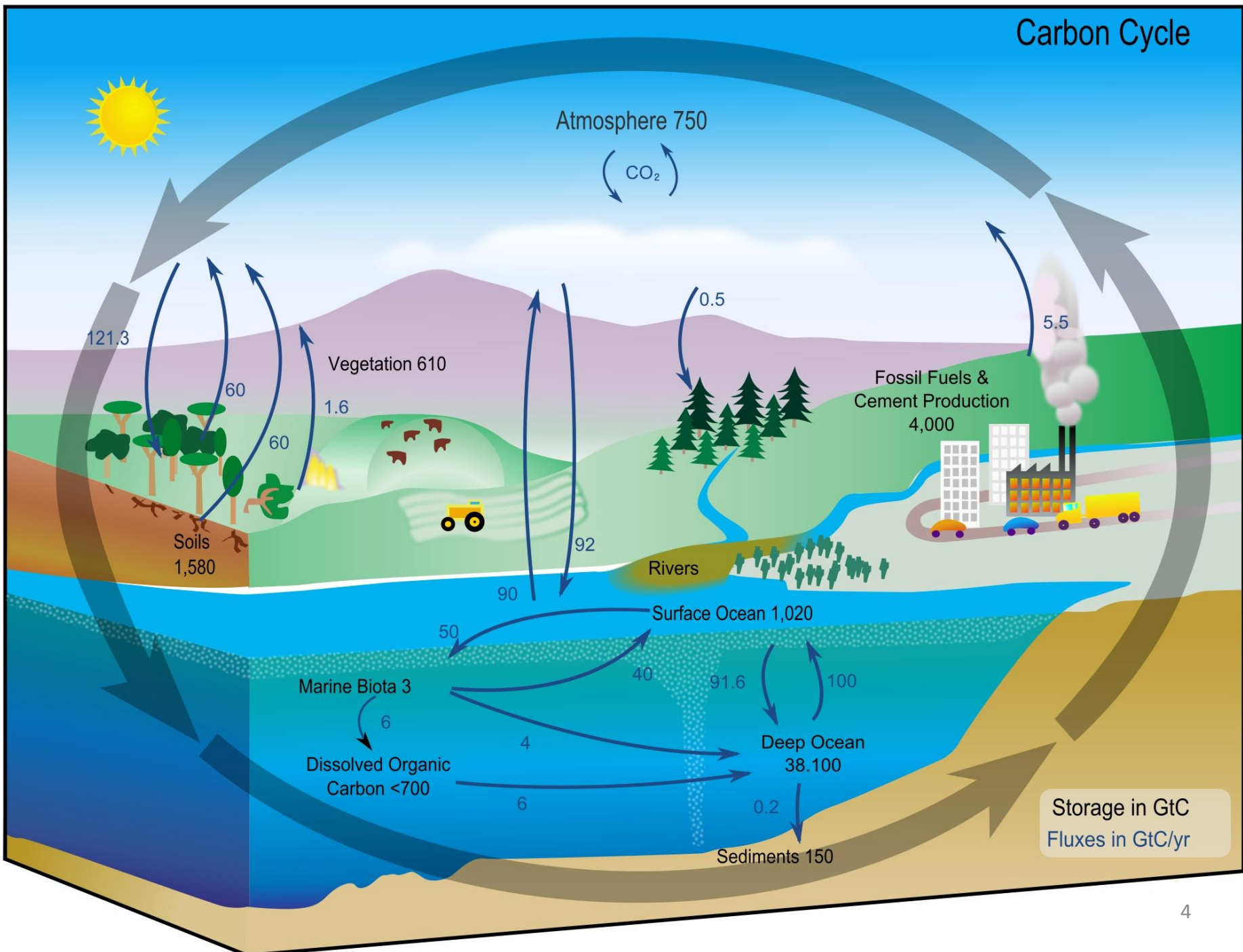
Кларк в литосфере равен  $2,3 \times 10^{-2}\%$ , чистых известняках – 12%, каменном угле – 80, нефти 85%. Число собственных минералов – 112. В земной коре, в основном, находится в виде известняков и доломитов.

Живое вещество является аккумулятором углерода. В растениях на его долю приходится 45%, в животных – 63% от массы сухого вещества. В гумусе почвы С составляет 58%.

Наиболее распространенным соединением С является диоксид углерода  $\text{CO}_2$ , который ассимилируется зеленым листом растений в процессе фотосинтеза. В зоне гипергенеза, особенно в почвах, может накапливаться до 3%  $\text{CO}_2$ .

С – 4-й по распространенности элемент в космосе (после Н, He, O).

# Carbon Cycle

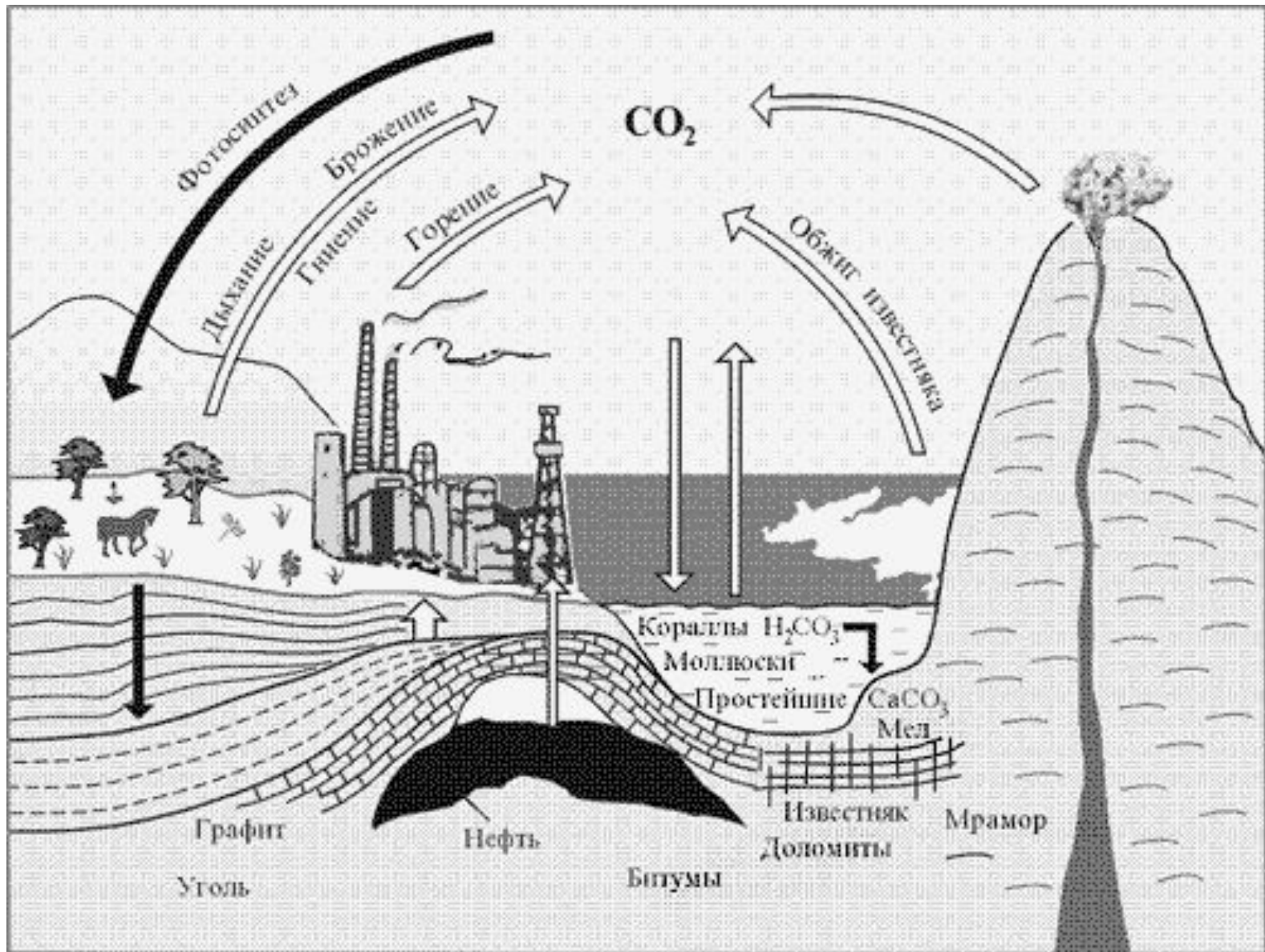




## Распределение углерода в биосфере

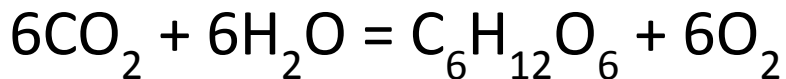
Резервуары	Масса, 10 <sup>9</sup> т (гигатонн)
<b>Атмосфера</b>	668
<b>Биомасса суши</b>	900
<b>Почва, всего</b>	1 550
В.т.ч. лесная подстилка	100
Торф	250
Гумус	1 200
<b>Океан, всего</b>	40 704
В т. ч. биомасса	4,0
Растворенное взвешенное органическое вещество	2 100
Растворенные гидрокарбонат-ионы	38 600
<b>Земная кора, всего</b>	118 000 000
Осадочная оболочка, Сорг.	15 000 000
Осадочная оболочка, Скарб.	81 000 000
Гранитный слой континентального блока, всего	22 000 000

# Потоки углерода



# Фотосинтез

Глобальный биогеохимический цикл углерода состоит из 2-х крупных циклов более низкого ранга. Первый обусловлен связыванием углекислого газа в органическое вещество путем фотосинтеза и новым образованием  $\text{CO}_2$  в процессе трансформации первичного органического вещества организмами-гетеротрофами и почвенными микроорганизмами. Если бы этот цикл был полностью замкнутым, то количество поглощенного при фотосинтезе углекислого газа должно полностью возвращаться в исходный резервуар – атмосферу.



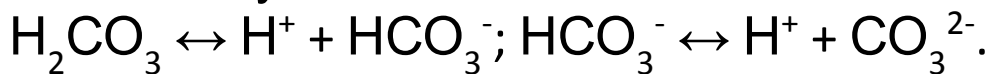
На протяжении года живое вещество суши и океана поглощает около  $440 \times 10^9$  т  $\text{CO}_2$  или  $120 \times 10^9$  т  $\text{C}_{\text{орг}}$ , большая часть которого вновь возвращается в океан и атмосферу.



# Взаимодействие CO<sub>2</sub> атмосферы и природных вод

Между газами тропосферы и поверхностным слоем океана существует подвижное равновесие. Растворимость газов воде зависит от давления, температуры, а также от количества растворенных солей. Увеличение роста растворимости происходит по мере роста парциального давления согласно зависимости Дальтона-Генри. В пресной воде газы растворяются больше, чем в соленой, но из-за малого количества пресных вод на Земле в глобальном балансе CO<sub>2</sub> они играют скромную роль.

Растворимость CO<sub>2</sub> уменьшается с возрастанием температуры: при 0°C растворяется 1,71 мл/л; при 25°C – 0,76. Среднее содержание углекислого газа, растворенного в морской воде, равно 0,75 мл/л. В отличие от других газов CO<sub>2</sub> вступает в химическое взаимодействие с морской водой. При этом образуется угольная кислота:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$ . Эта кислота двухосновная и диссоциирует ступенчато, образуя карбонат-гидрокарбонатную систему:



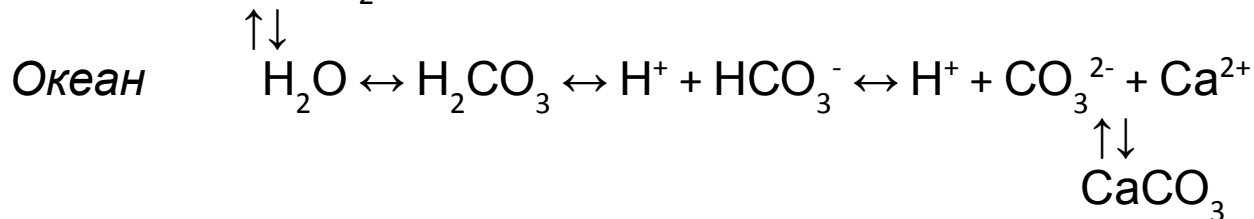
# Массообмен CO<sub>2</sub> между атмосферой и океаном

Углекислый газ активно растворяется в холодной воде приполярных районов океана. При охлаждении возрастает и плотность воды. Массы холодной воды опускаются на глубину и в виде мощных холодных течений перемещаются к экватору. Они постепенно нагреваются, уменьшают плотность, поднимаются наверх и освобождаются от избытка CO<sub>2</sub>. Океан действует как грандиозный насос, забирая CO<sub>2</sub> из атмосферы в холодных областях и отдавая его в тропических областях.

На массообмен CO<sub>2</sub> между поверхностным слоем океана и тропосферой весьма активно влияют живое вещество планктона, освещенность, сезонно-термические условия. Определенный вклад в массообмен углерода между атмосферой и океаном вносит захват гидрокарбонатов ветром с брызгами волн и возвращение их в океан с атмосферными осадками.

Полная карбонат-гидрокарбонатная система включает образование карбоната кальция:

Атмосфера CO<sub>2</sub>



# Фракционирование изотопного состава углерода

Масса земного углерода состоит из двух стабильных изотопов  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$  и исчезающе малых количеств  $^{14}\text{C}$  (радиоактивный с периодом полураспада 5730 лет).

Соотношение  $^{12}\text{C} : ^{13}\text{C}$  варьирует в разных природных объектах от 88 до 94.

- В живом веществе около 90,5;
- в углекислом газе атмосферы и гидросферы 89,5;
- в карбонатных отложениях 88,6.

Во время фотосинтеза происходит более быстрое поглощение легкого изотопа  $^{12}\text{C}$  и вследствие этого обогащение им углерода органического вещества. Особенно активно этот процесс происходит под влиянием микробиологических процессов. По этой причине метан микробиологического происхождения максимально обогащен легким изотопом. Так как фотосинтезируемое органическое вещество захватывает  $^{12}\text{C}$ , карбонаты обогащены тяжелым изотопом  $^{13}\text{C}$ .

# Соотношение масс органического и карбонатного углерода

На протяжении длительного времени происходило закономерное распределение исходного  $\text{CO}_2$  между фотосинтезом и образованием карбонатов. При этом более 80% углерода, поступавшего в атмосферу при дегазации мантии, связывалось в карбонатах.

Соотношение масс  $\text{C}_k$  и  $\text{C}_{\text{орг}}$  является важным показателем, который характеризует «лимит роста» живого вещества на разных этапах геологической истории. Соотношение масс карбонатного и органического углерода закономерно уменьшалось на протяжении последних 1,6 млрд. лет. Так, в толще осадков верхнего PR (1600-570 млн. лет) отношение  $\text{C}_k : \text{C}_{\text{орг}} = 18$ ; в осадочной толще PZ (570-400 млн. лет) – 11; в осадках MZ (235-66 млн. лет) – 5,2; KZ – 2,9.

Неуклонное возрастание относительного содержания органического вещества во взвесах, выносимых реками с древней суши, свидетельствует об увеличении продуктивности наземных фотосинтезирующих организмов и о постепенном усилении роли растительности Мировой суши в глобальной фиксации  $\text{CO}_2$ .

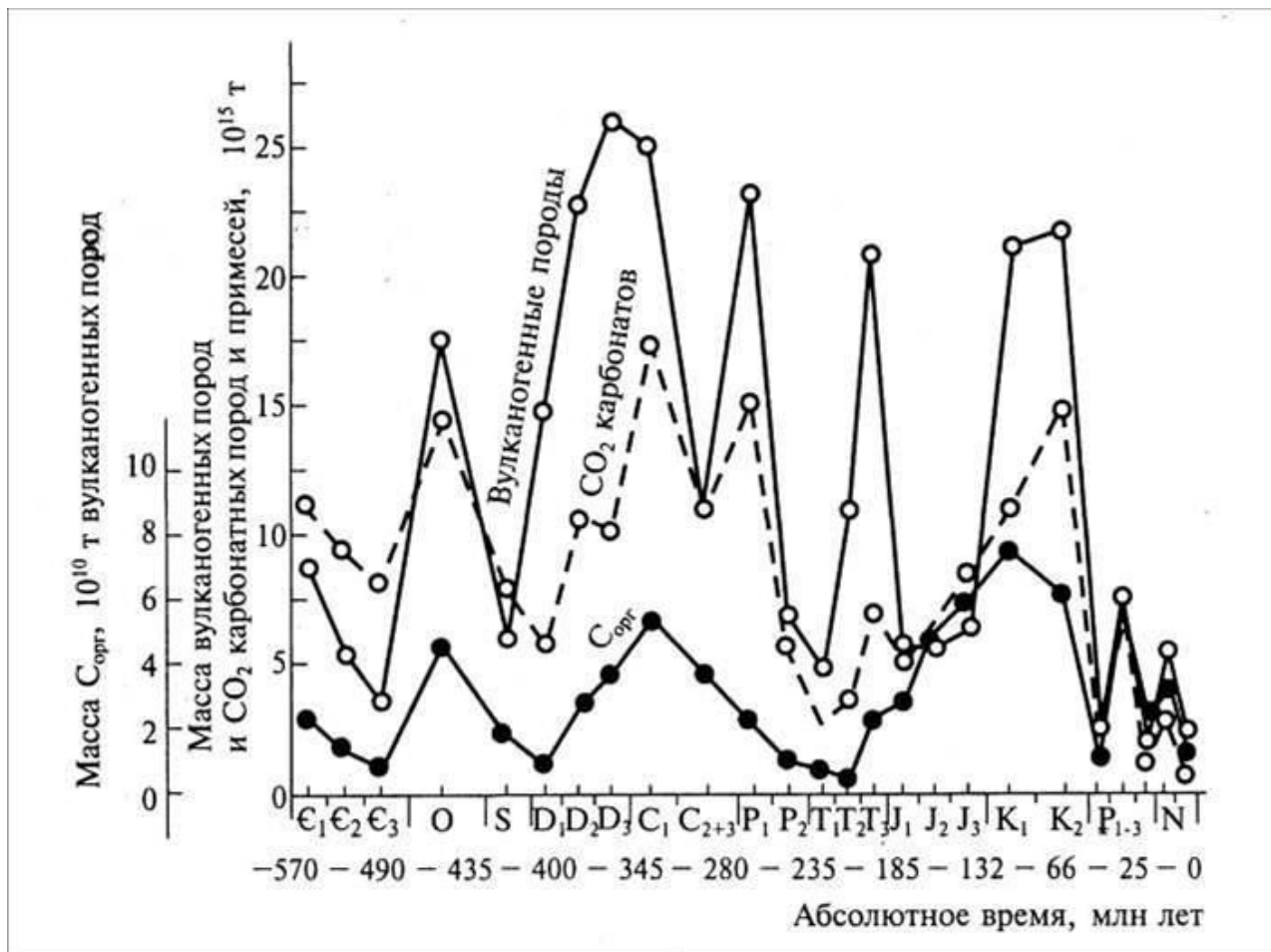
Карбонатообразование и фотосинтез органического вещества имеют общую направленность на удаление из атмосферы  $\text{CO}_2$ , непрерывно поступающего из мантии. Возможно, что эти процессы являются частью глобального механизма поддержания невысокой концентрации  $\text{CO}_2$  в газовой оболочке Земли.

# Вулканические газы как источник $\text{CO}_2$ в атмосфере

Были определены объемы всех типов осадочных горных пород, образованных на протяжении фанерозоя, и рассчитано количество углерода, содержащегося в карбонатных породах и рассеянном органическом веществе. Одновременно установлен объем вулканических лав, которые изливались в те периоды, когда отлагались осадки.

Обнаружено, что массы  $\text{CO}_2$ , связанного в карбонатных толщах, и углерода, содержащегося в рассеянном органическом веществе древних пород, изменяются согласно с колебаниями величин объемов вулканических пород. В те эпохи, когда происходили бурные извержения вулканов и изливалось огромное количество лавы, отлагалось особенно много карбонатных пород и рассеянного органического вещества. Объем лав отражает интенсивность выноса вулканических газов.

# Изменение во времени массы вулканических пород, суммарной массы $\text{CO}_2$ карбонатных пород и массы органического углерода



# Влияние CO<sub>2</sub> на изменение климата

Создание биосферы и поддержание ее функционирования обусловлены геохимической деятельностью живого вещества. Если бы организмы не обеспечивали геохимический цикл С, поддерживающий невысокую концентрацию CO<sub>2</sub> в атмосфере, то захороненное количество углерода находилось бы в виде углекислого газа в атмосфере в десятки тысяч раз больше, чем сейчас. Это имело бы самые серьезные последствия из-за парникового эффекта.

Молекулы CO<sub>2</sub> в атмосфере поглощают инфракрасное (тепловое) излучение Земли и излучают поток энергии к земной поверхности. Сильное повышение содержания углекислого газа могло вызвать очень сильное повышение температуры и разогревание поверхности планеты вплоть до испарения Мирового океана.

Усиление притока углекислого газа в периоды активного вулканизма, по-видимому, сопровождалось общим потеплением климата, уменьшением контрастности температур высоких и низких широт.

Некоторые ученые предполагают, что смена ледниковых и межледниковых периодов в плейстоцене обусловлена колебаниями содержания углекислого газа в атмосфере. Можно допустить, что распространение материкового льда и сильное сокращение площади лесной растительности с характерной высокой биомассой способствовало повышению углекислоты в воздухе и относительному потеплению. Вызванное этим сокращение ледников и распространение лесов сопровождалось изъятием CO<sub>2</sub> из атмосферы и связыванием его в биомассе и органическом веществе педосферы, что в свою очередь вызвало постепенное похолодание и появление очередного материкового оледенения, за которым следовало сокращение площади лесов и повторение всего цикла.