

Российская Академия Наук  
Институт Океанологии  
им.П.П.Ширшова



Московский университет  
Географический факультет

# ЦИКЛ УГЛЕРОДА В МИРОВОМ ОКЕАНЕ

Е.А.Романкевич, В.С.Савенко, А.А.Ветров

# план доклада

1. Методология изучения цикла углерода в океане
2. Основные типы и формы существования углерода в океане
3. Потoki углерода в океане
4. Баланс углерода в океане
5. Нерешенные проблемы

## цель доклада

Представить биогеохимический подход и результаты оценок потоков и баланса углерода (органического и карбонатного) в Мировом океане.

# Методология, принятая в работе

Многодисциплинарное изучение цикла углерода в системе океан-атмосфера-литосфера.

Получение сопоставимых данных по биопродукционным, седиментационным потокам, массам, распределению и накоплению углерода в донных осадках океана.

Выбор необходимого и достаточного набора параметров измерений, их точности и дискретности, анализ гипотез и альтернатив.

Создание усовершенствованных методов отбора и анализа проб, адекватных поставленной задаче.

Получение квазиодновременной спутниковой информации и наблюдений *in situ*, а также сопутствующих данных по гидрологической, метеорологической ситуации, биологическим и геолого-геохимическим показателям.

## Материалы, на которых основан доклад

- Современные представления о цикле углерода базируются на результатах, выполненных по проектам Scientific Committee on Problems of the Environment (**SCOPE**), International Council of Scientific Union (**ICSU**) (например, The Major Biogeochemical Cycles and Their Interactions, 1983), The International Geosphere–Biosphere Programme (**IGBP**), Joint Global Ocean Flux Study (**JGOFS**), Land-Ocean Interaction in the Coastal Zone (**LOICZ**), Global Oceanic Ecosystem Dynamics (**GLOBEC**), Climate Variability and Prediction (**CLIVAR**), а также ряда федеральных программ России, например, «Мировой океан», Проектов, поддержанных Российским фондом фундаментальных исследований (**РФФИ**) и др. **В настоящее время вышло 20 томов «Global Biogeochemical Cycles».**
- Ранее накопленные многолетние результаты изучения геохимической истории углерода в биосфере, трансформации и переходов его различных форм, биогеохимии и круговорота были подвергнуты ревизии и после верификации использованы в основной своей части.
- Наиболее общими результатами работ за последние 15-20 лет явилось, **во-первых**, увеличение в тысячи раз информации о параметрах, характеризующих потоки разных форм углерода (газообразного, твердого, растворенного, взвешенного, органического и неорганического), **во-вторых**, системный подход, предусматривающий получение междисциплинарных сведений о процессах сопряженных биогеохимических C, N, P, S циклов, необходимых для интерпретации биосферного круговорота углерода, **в-третьих**, улучшение методов определения форм углерода и его состава с выявлением органо-химических и других физико-химических и литологических индикаторов процессов, **в-четвертых**, формулировка пробелов изучения циклов углерода **и, наконец**, сформированы новые задачи и программы **в рамках IGBP/SCOR**, например, Integrated Marine, Biogeochemistry and Ecosystem Research (**IMBER, 2005**), Surface Ocean-Lower Atmosphere Study (**SOLAS, 2005**), а также в Российских фундаментальных и инновационных программах Минобрнауки РФ, РФФИ, Президиума РАН.

# Некоторые термины и их смысл

*Все понятия о предметах и явлениях определяются терминами, в которые ученые часто вкладывают разный смысл и объем.*

- Биосфера– область существования живого вещества на Земле, которая включает живые организмы и среду их обитания (Вернадский, 1926, 1965)
- Балансовый подход основан на законе сохранения масс веществ и допущении стационарного состояния океана. При таком подходе сумма природных статей углерода должна соответствовать сумме расхода.
- Масштаб времени и пространства. В докладе рассматривается современный Мировой океан в интервале времени 100-1000 лет

# Актуальность проблемы

## Круговорот углерода определяет многие параметры функционирования биосферы:

- Потоки и геохимию почти всех химических элементов, многие из которых функционально связаны с потоками разных форм углерода.
- Потоки парниковых газов  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  и газовый обмен, влияющие на климат планеты.
- Биопродуктивность, биомассу и во многом биоразнообразие сообществ морских организмов.
- Выветривание, гальмиролиз, аутигенные минералообразование.
- Микробиологическую активность.
- Углерод служит энергетической основой всех литолого-химических процессов осадконакопления, диагенеза, катагенеза.
- Незамкнутый цикл углерода определяет накопление в донных осадках исходного для нефти и газа органического вещества.

# Основные типы существования углерода (С) в океане

## Типы углерода

- Неорганический углерод ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CaCO}_3$  и др.)  $m \sim 38.5 \times 10^{12}$  т
- Углерод живого вещества  $m \sim 4 \times 10^9$  т
  - фитопланктона + фитобентоса  $m \sim 1.7 \times 10^9$  т
  - зоопланктона  $m \sim 1.6 \times 10^9$  т
  - зообентос  $m \sim 0.7 \times 10^9$  т
- Углерод органических соединений (их несколько миллионов, а с изомерами многократно больше)  $m \geq 1000 \times 10^9$  т
  - полисахариды, другие углеводы;
  - белки, аминокислоты, нуклеиновые кислоты;
  - липиды в т.ч. углеводороды, фенолы;
  - стерины, стераны и др.;
  - гуминовые и фульвовые кислоты;
  - кероген (древнее остаточное ОВ).

# Формы органического углерода в океане

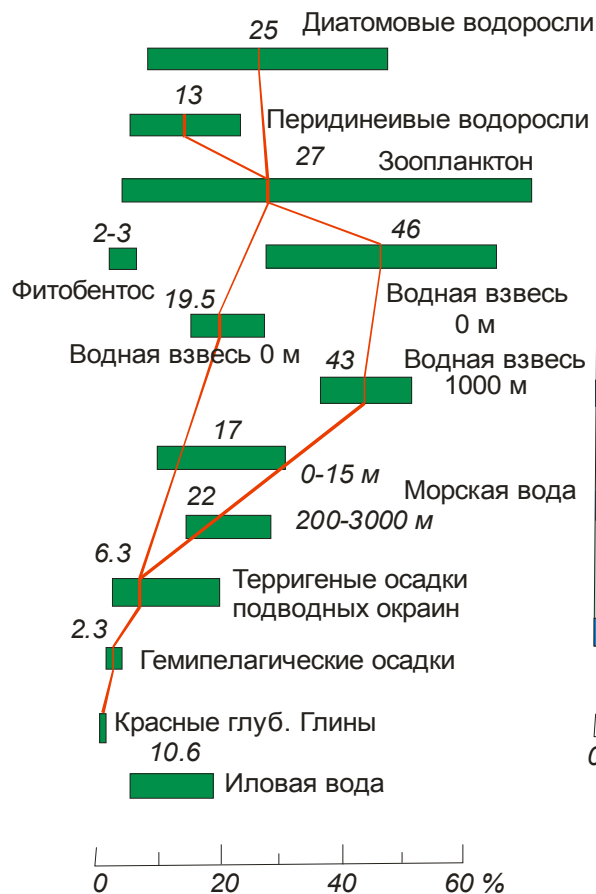
- Растворенная (истинные растворенные соединения, частицы <1нм)
- Коллоидная форма  
наносистемы 1-10 нм  
высокодисперсные 10-1000 нм  
грубодисперсные 1-100 мкм
- Взвешенная форма (>0.45 мкм)  $m \sim 30-50 \times 10^9$  т
- Углерод донных осадков голоцена  $m \sim 1500-4000 \times 10^9$  т
- Углерод иловой воды голоцена  $m \sim ? \times 10^9$  т
- Газогидраты  $1.5 \times 10^{16} - 2 \times 10^{19} \text{ м}^3$  ( $1.5 - 2 \times 10^{16} \text{ м}^3$ )
- Углерод в составе обломков пород  $m \sim ? \times 10^9$  т

$m \sim 750-1000 \times 10^9$  т

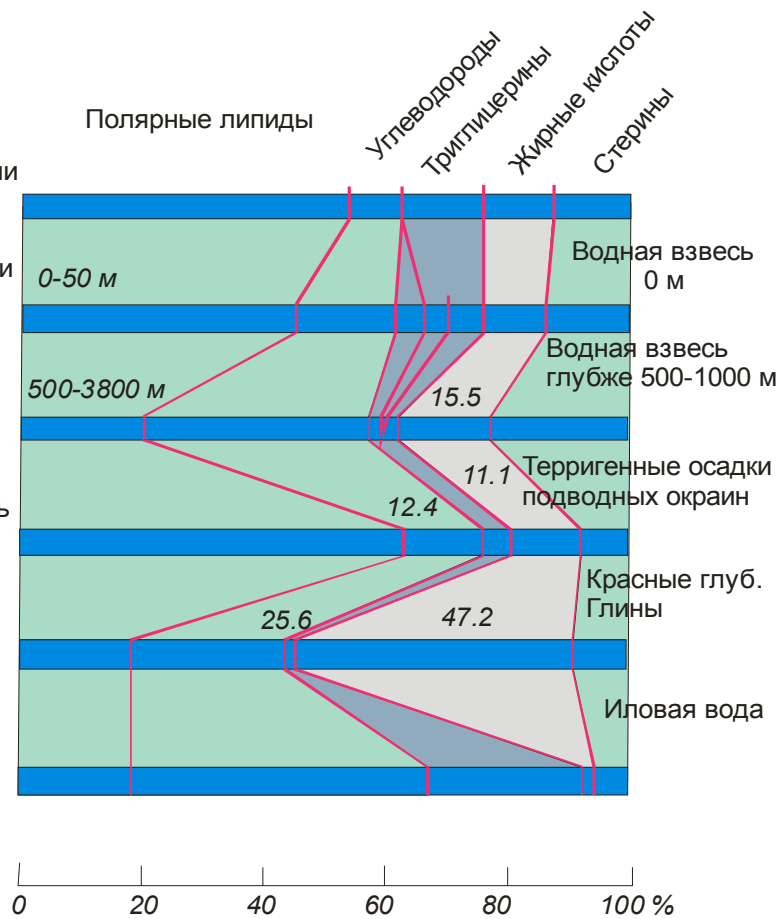


# Трансформация важнейших классов органических соединений в системе: планктон, взвесь, донные осадки

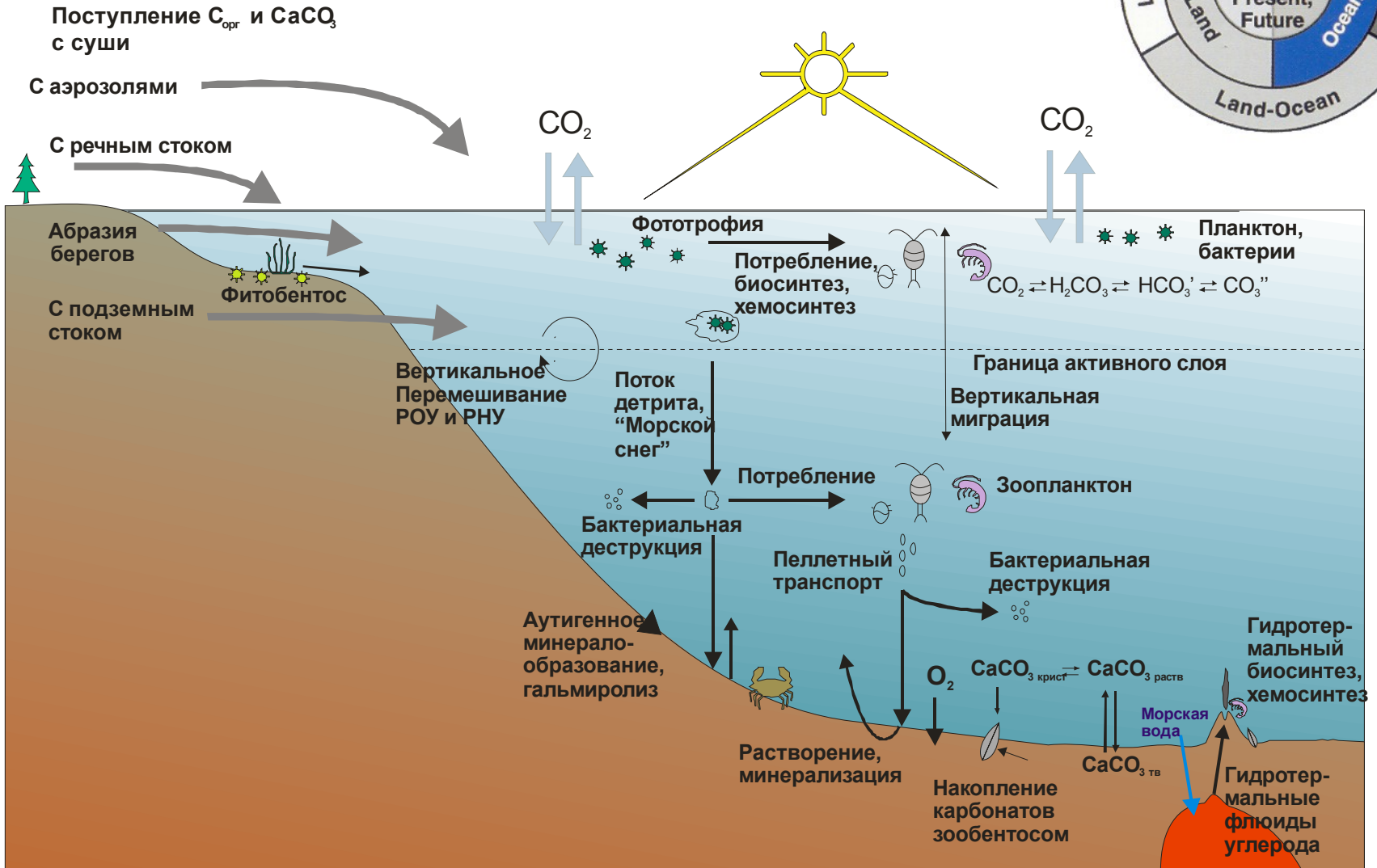
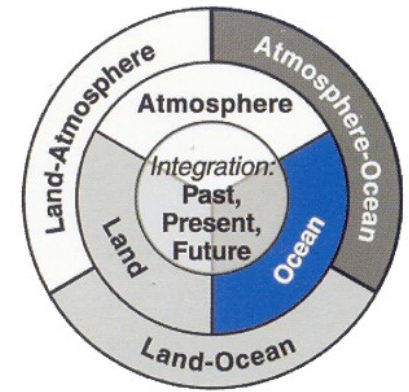
## Изменение концентраций



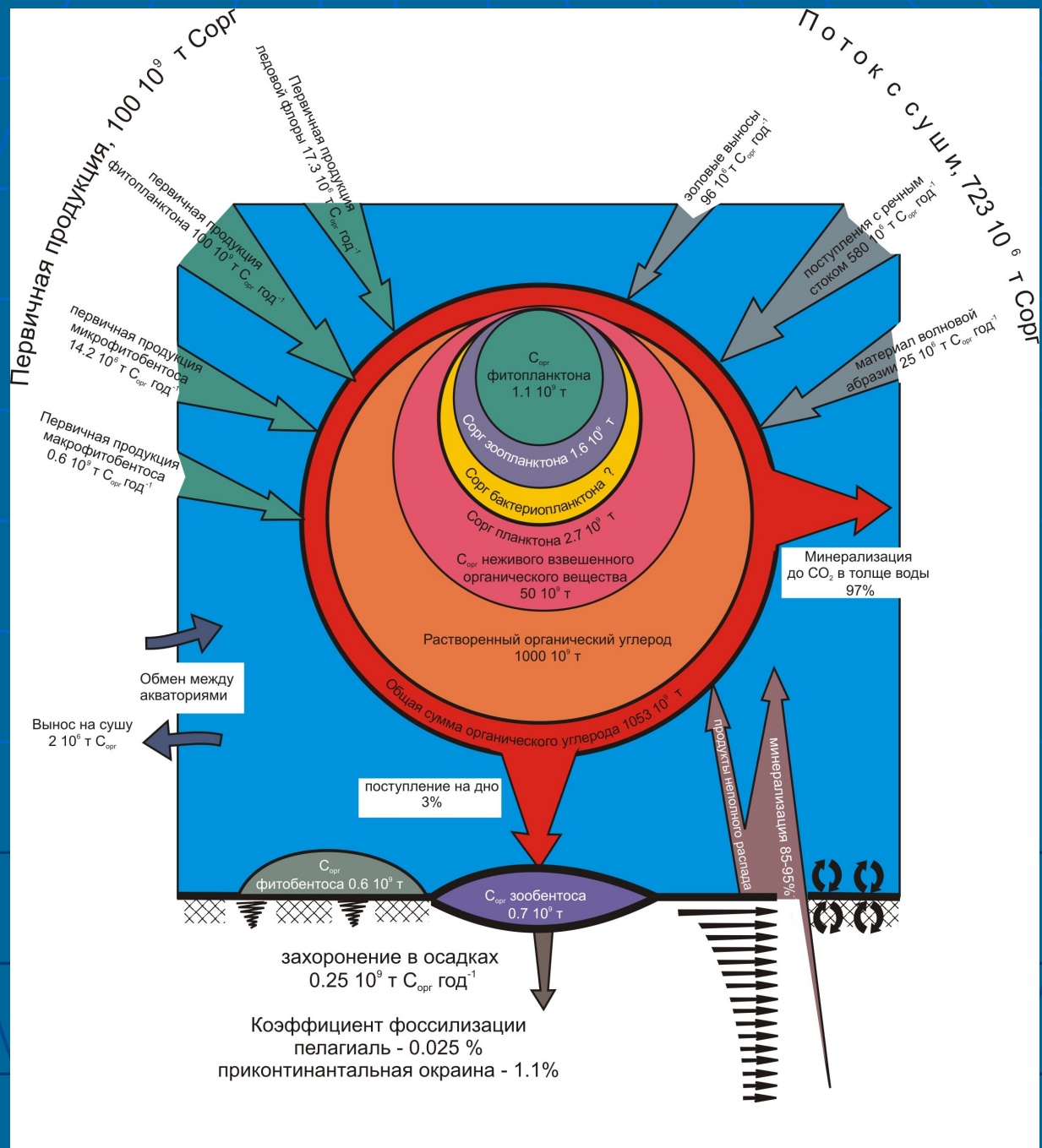
## Изменение состава



# Поступление и круговорот углерода в Мировом океане (схема)



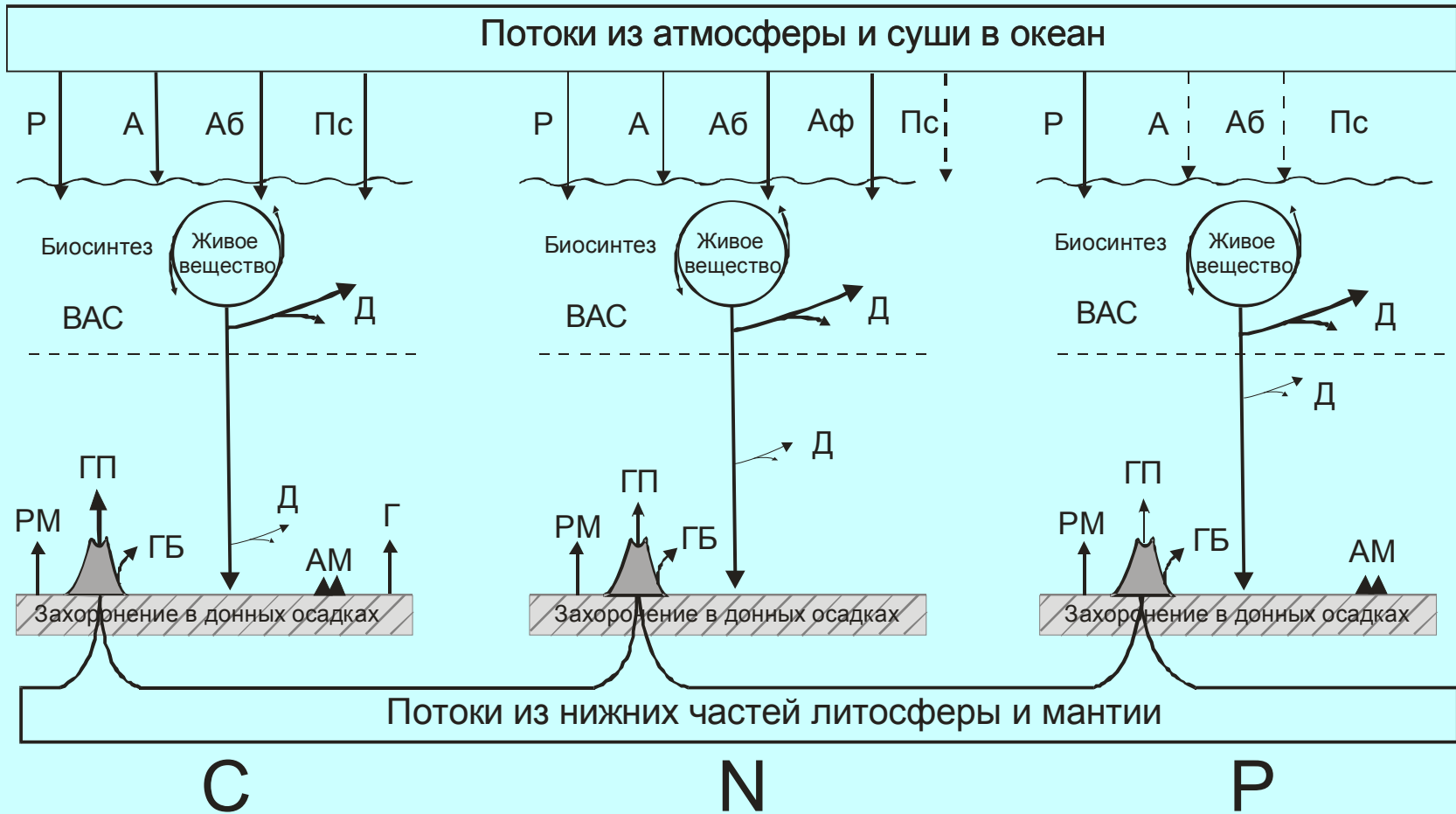
# Потоки углерода в Мировом океане



# Принципиальная схема биогеохимического цикла углерода в Мировом океане



# Принципиальная схема биогеохимических циклов С, N, Р в современном Мировом океане



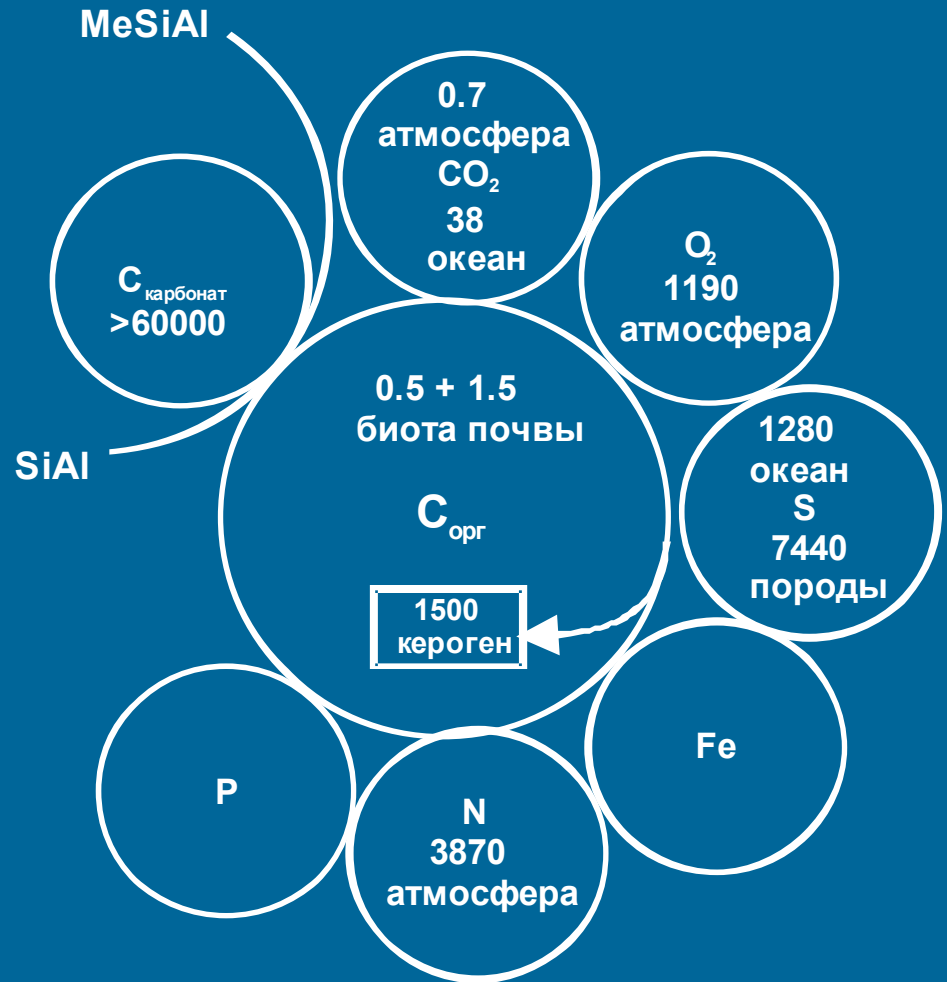
Р - речной сток; А - атмосферный сток; Аб - абразия; Пс - подземный сток; Аф - азотфиксация; Д - деструкция; РМ - растворение, минерализация; ГП - гидротермальный поток; ГБ - гидротермальный биосинтез; АМ - аутигенное минералообразование; Г - гальмиролиз (подводное выветривание); ВАС - верхний активный слой;

# Сопряжение биогеохимических циклов

Все величины даны в  $10^{18}$  г

Ключевая роль органического углерода выражается в сопряжении циклов различных веществ

С циклом органического углерода стехиометрически связаны циклы N, P, Si, Se, Fe  
C:N = 6,  
C:P от 106 до 500 (у деревьев)



# Баланс углерода в Мировом океане, $10^6$ т С/год

(без учета обмена CO<sub>2</sub> на границе океан-атмосфера)

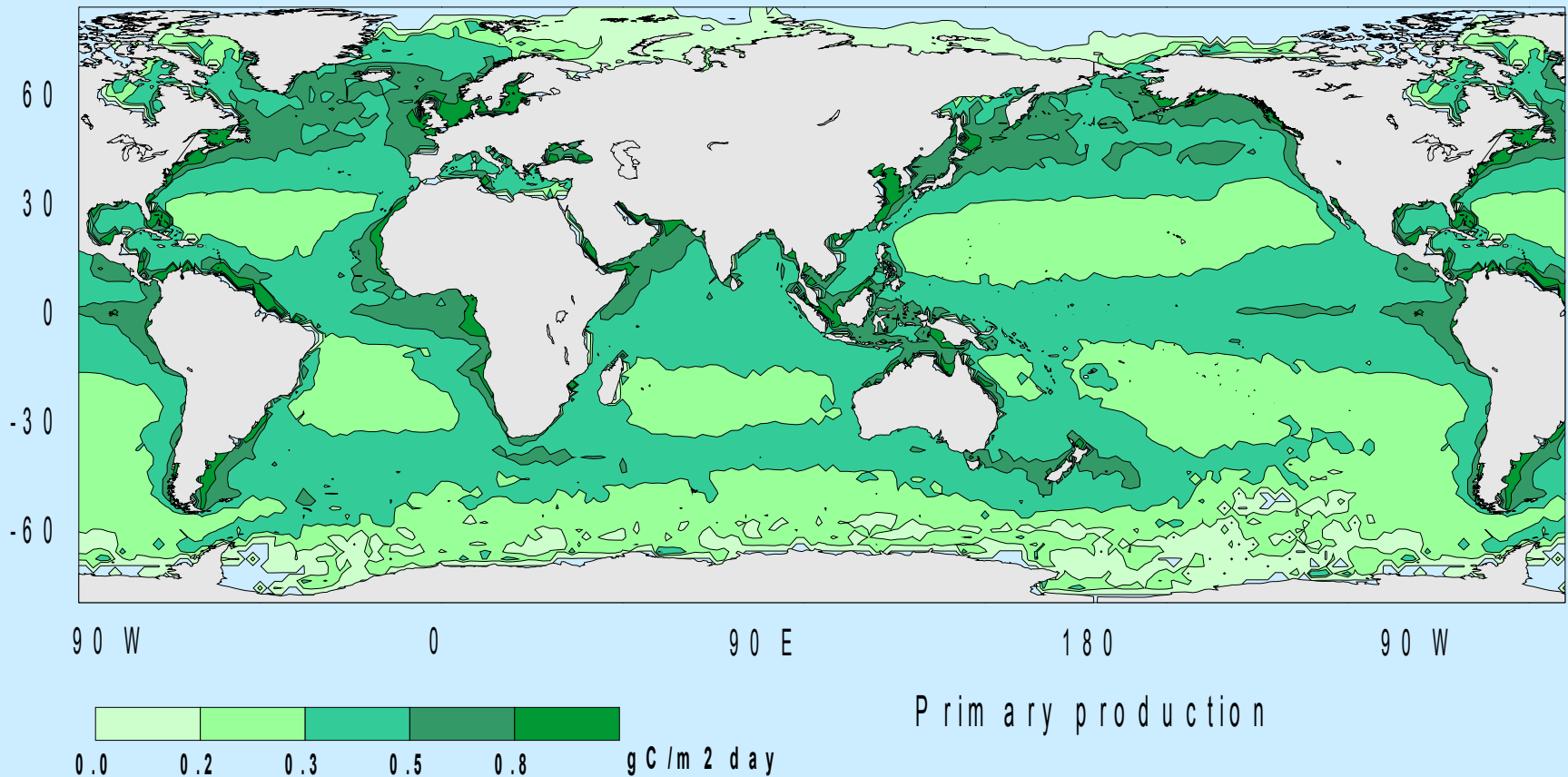
Источник	C <sub>орг</sub>	C <sub>карб</sub>	C <sub>карб</sub> + C <sub>орг</sub>
<b>Поступление (П)</b>			
<b>Потоки с суши растворенных веществ</b>	210	502	712
речной сток	14	91	105
подземный сток	~ 2	?	—
ледовый сток	?	?	—
абразия берегов	?	?	—
атмосферные растворенные вещества	226	593	819
<b>Сумма</b>	370	123	493
<b>Потоки с суши твердых веществ</b>	6	32	38
речной сток	25	22	47
ледовый сток	96	21	117
абразия берегов	?	17	17
эоловый сток	497	240	737
подводный вулканизм	?	25	25
<b>Сумма</b>	723	833	1556
<b>Дегазация базальтовых магм</b>			1556
<b>Сумма поступления с суши</b>			
<b>Выведение (В)</b>			
<b>Вынос на сушу с атмосферными осадками</b>	2	2	4
<b>Захоронение в донных осадках</b>	250	780	1030
<b>В том числе:</b>			
на шельфе и континентальных склонах	96%	65%	72%
на ложе океана	4%	35%	28%
<b>Невязка баланса ("+" П&gt;В)</b>	+ 471	+ 51	+ 522

# Геохимический баланс фосфора в Мировом океане

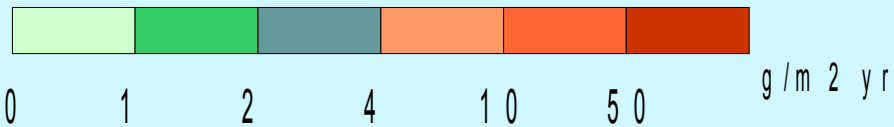
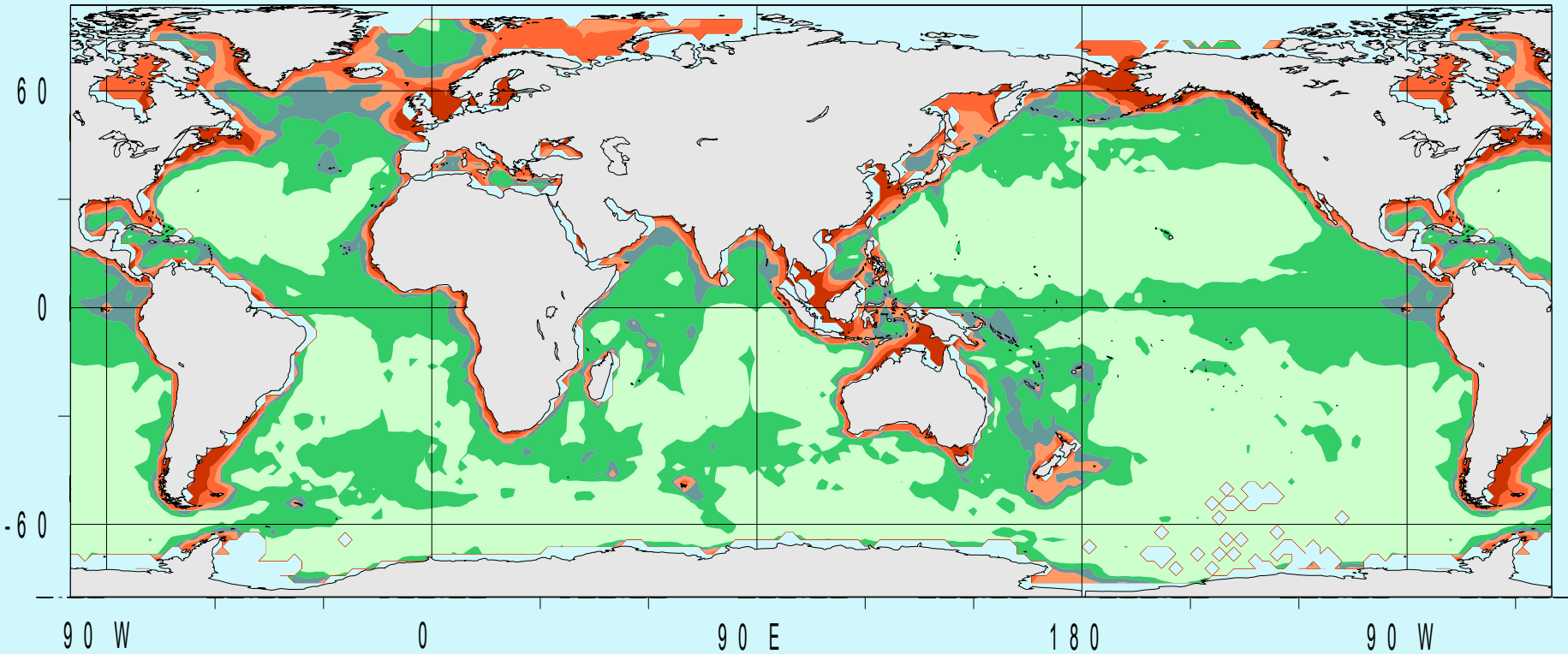
Статья баланса	Поток вещества, млрд. т/год	Содержание фосфора, мкг Р/г	Поток фосфора, млн. т Р/год
<b>ПОСТУПЛЕНИЕ:</b>			
речной сток растворенных веществ	42100	0.108	4.5
сток взвешенных наносов	15.5	1000	15.5
сток влекомых наносов	3.1	800	2.5
подземный сток растворенных веществ	2200	0.058	0.1
ледовый сток, абразия берегов и дна	2	870	1.7
выпадение терригенных аэрозолей	0.87	2000	1.7
подводные гидротермы	55	30	1.7
<b>общее поступление</b>			<b>27.7</b>
<b>ВЫВЕДЕНИЕ:</b>			
образование донных отложений	19.8	690	13.7
вынос в составе морских аэрозолей	1.9	11	0.02
<b>общее выведение</b>			<b>13.7</b>
<b>НЕВЯЗКА БАЛАНСА</b>			<b>+14.0</b>



# Среднегодовая продукция фитопланктона (70-100 млрд т С в год)



# Поступление органического углерода на дно



TOC Flux to seafloor

$$F = 33 PP / Z$$

F – поток  $C_{\text{орг}}$

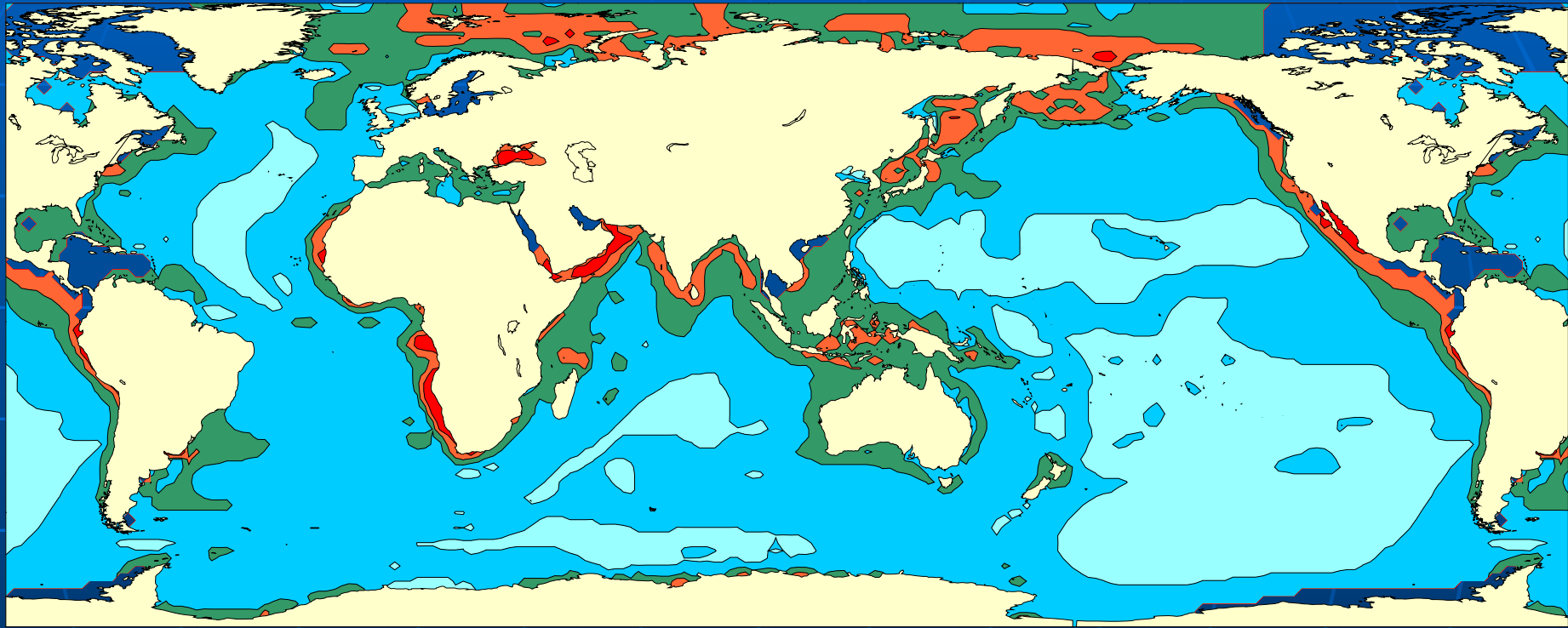
PP – первичная продукция

Z - глубина

# Методы определения потоков веществ в океане

- Метод седиментационных ловушек
- . Изотопные методы на основе радиоизотопов ( $^{234}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{Th}$  и других)
- По параметрам функционирования планктонных сообществ
- . Балансовый метод, учитывающий латеральные, вертикальные потоки углерода и связанных с ним химических элементов
- Ориентировочные расчеты по максимальным и минимальным концентрациям взвеси в потоке

# Процентные концентрации органического углерода в Мировом океане



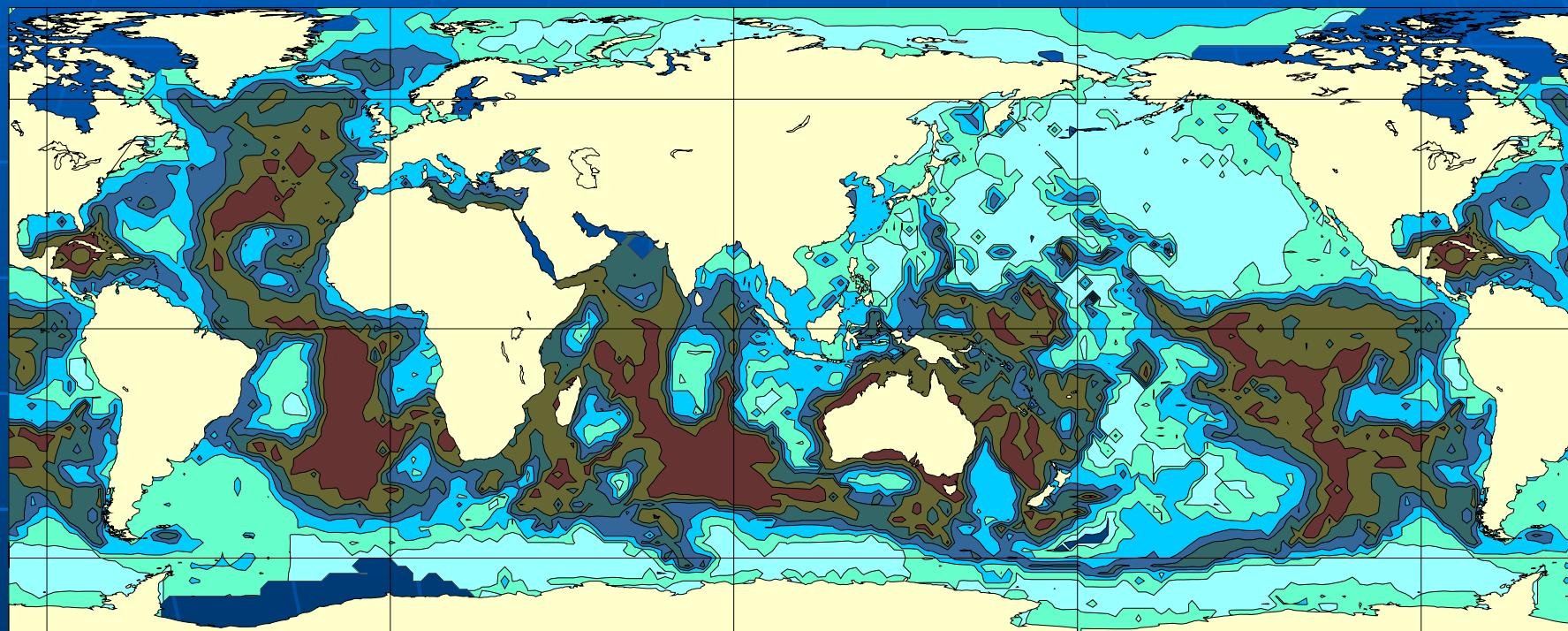
90 W                      0                      90 E                      180                      90 W



0      0.25      0.5      1      2      % on dry sediment

Organic carbon

# Углерод карбонатов в донных осадках Мирового океана, % на сухое в-во



90 W

0

90 E

180

90 W



0

0.1

1

3

5

7

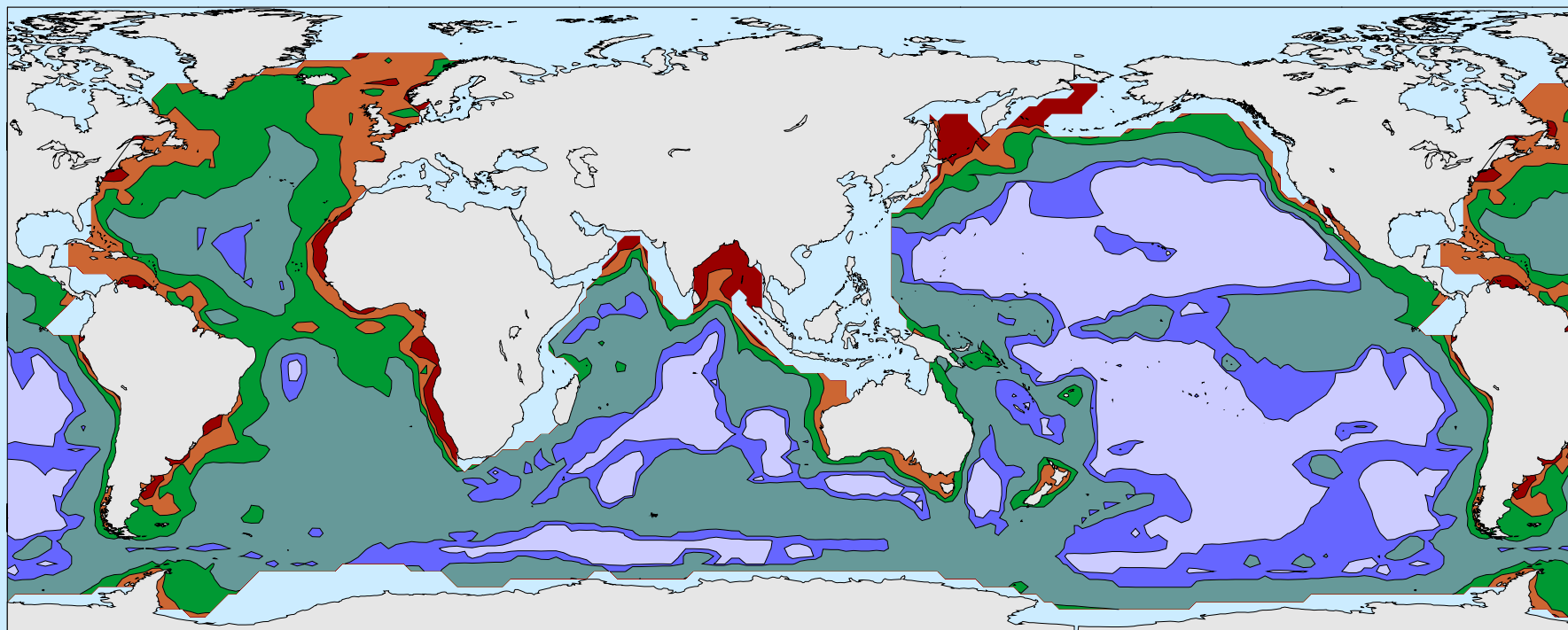
9

% on dry weight

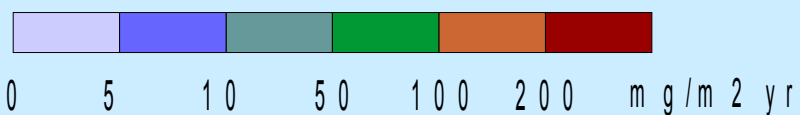
Carbonates

(Lisitzin 78, Archer 96, database "Carbon")

# Скорости накопления органического углерода в донных осадках океана (абсолютные массы)



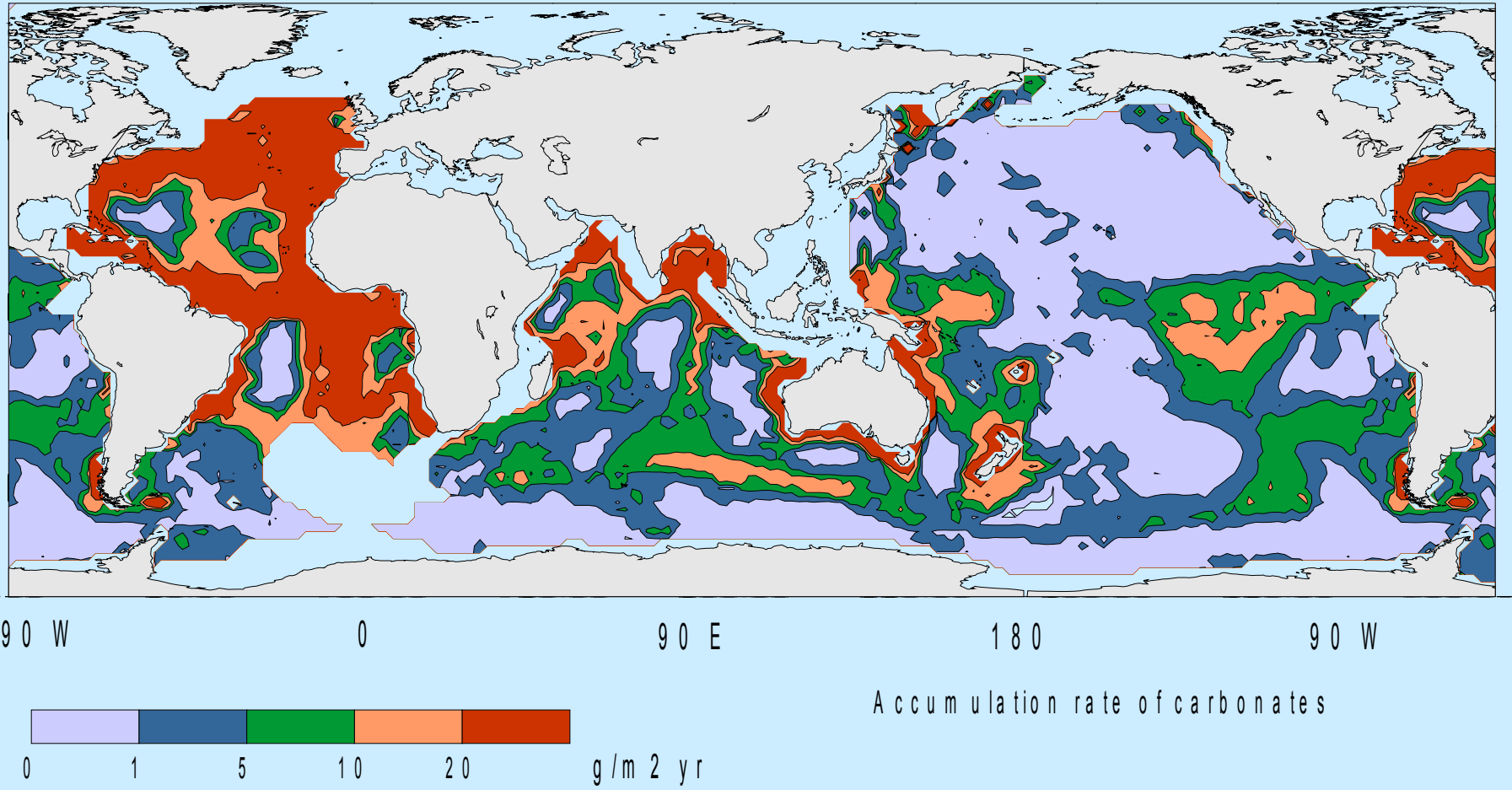
90 W                      0                      90 E                      180                      90 W



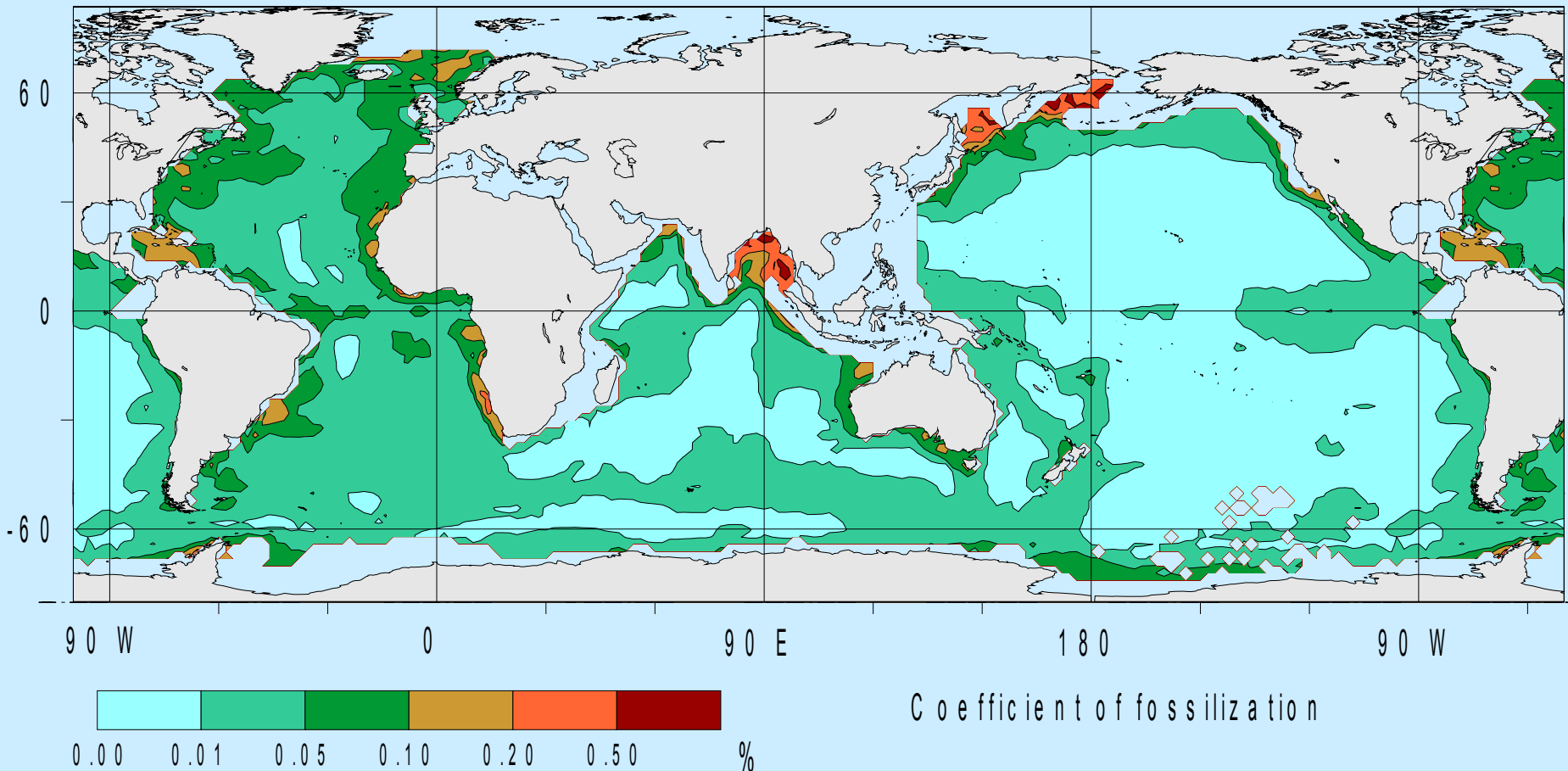
Accumulation rate of organic carbon

$N \sim 12000$

# Скорости накопления карбонатов в донных осадках океана



# Коэффициент фоссилизации органического углерода



Среднее для ложа океана - 0.025,  
Среднее для континентальной окраины – 1.1%  
Сбалансированность цикла  $\text{C}_{\text{орг}}$  – 99.5%



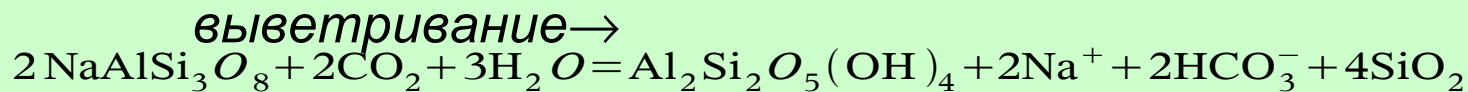
# Основные нерешенные вопросы в круговороте углерода

I. Причины роста  $p\text{CO}_2$  в атмосфере: 276 → 385 ppm

Антропогенный фактор, поступление ( $\sim 7 \times 10^9$  т/год)

Природные процессы (термоабразия, роль  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ )

II. При выветривании силикатов поглощается  $\text{CO}_2$  атмосферы, при метаморфизме и диагенезе, наоборот, выделяется свободный  $\text{CO}_2$ :



← *диагенез, метаморфизм*

При выветривании силикатов связывается 405 млн т  $\text{CO}_2$  в год (прямая реакция) и время прохождения всего атмосферного  $\text{CO}_2$  через процессы выветривания силикатов составляет 5750 лет. Следовательно, должен существовать мощный поток регенерированного  $\text{CO}_2$ , который предположительно связан с диагенезом осадков (обратная реакция).

# Основные нерешенные вопросы в круговороте углерода

- III. Неучтенные составляющие первичной продукции (нано- и пикопланктон, ледовые водоросли, фитобентос, диатомовые донные водоросли) и связывание  $\text{CO}_2$
- IV. Сколько  $\text{CO}_2$  выделяется (связывается) в рифтовых зонах океана, в зонах холодных сипингов, поток  $\text{CO}_2$  из подводных и грязевых вулканов
- V. Выяснение масштабов генезиса и потока метана и его гомологов из недр, газогидраты – запасы, скопления, дегазация.
- VI. Уточнение масштабов захоронения углерода и возвратного потока кислорода.
- VII. Уточнение баланса углерода в системе атмосфера-океан-литосфера на основе более точной оценки потоков углерода, взаимодействия C, S, N, P циклов.

# Вместо заключения

Таким образом, оценка в современном Мировом океане тесно связанных между собой потоков углерода и его баланса является важным путем поиска решений таких проблем как:

- рост в атмосфере  $\text{CO}_2$  от 276 до 385 ppm,
- прогнозируемого снижения pH поверхностных вод от современного значения  $8.1 \pm 0.1$  на 0.35 или даже на 0.77,
- буферной емкости океана,
- его химического состава
- и климата Земли.

Это крупные научные, социально значимые и жизненно важные проблемы.

# Приборная база лаборатории химии океана для исследований цикла углерода



Газовый хромато-масс-спектрометр GCMS-QP5050A «Shimadzu»



Высокоэффективный газовый хроматограф «Yano G-180 T.F.P.»



Комплекс для пробоподготовки образцов для выделения  
Приборы для пробоподготовки образцов



**Жидкостной хроматомасс-спектрометр LCMS – 2010EV «Shumadzu»**



**Высокоэффективный газовый хроматограф GC-2010 «Shumadzu»**



**Система сверхчистой очистки воды  
Милли Кью Градент А 10  
Milli-Q Gradient A10**



**Высокоэффективный газовый хроматограф GC-2014«Shumadzu»**