

«Потоки вещества на границе океан-
атмосфера:
пространственно-временные изменения
и значение для биогеохимической
структуры морских вод»

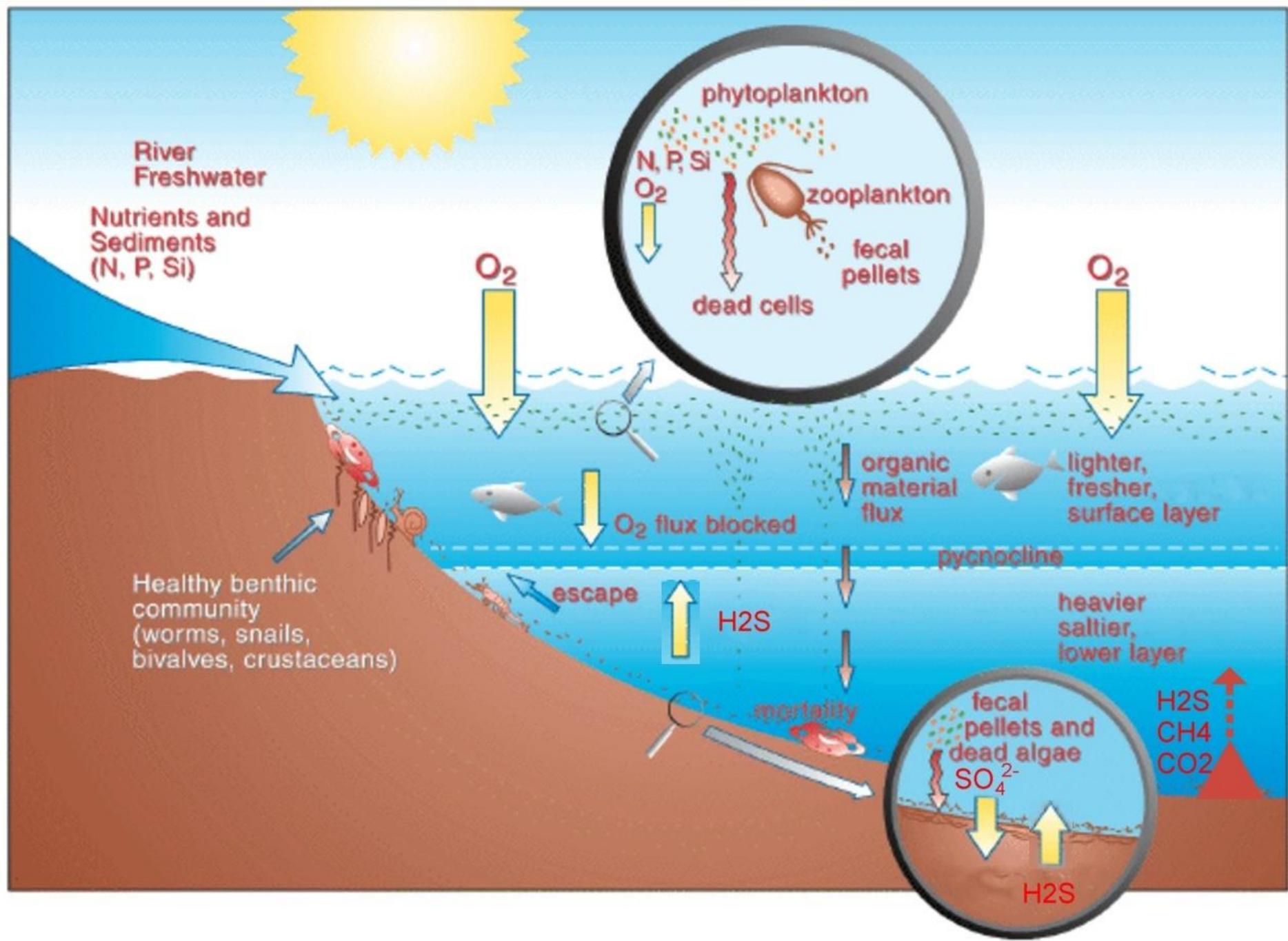
Коновалов С.К.

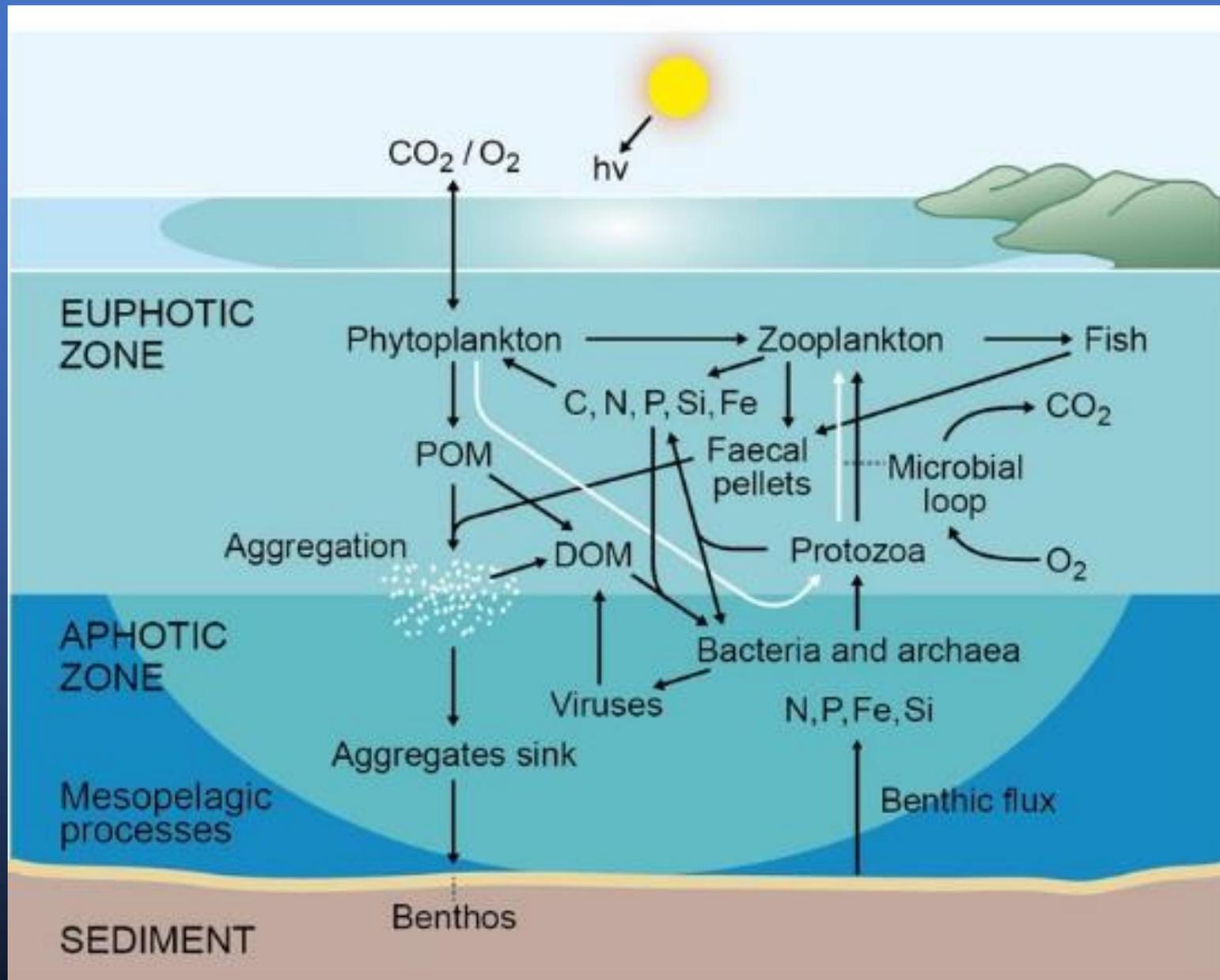
Морской гидрофизический институт РАН

Севастополь

План изложения материала:

- Потоки биогенных элементов (азота, фосфора, кремния) из атмосферы и их роль в биогеохимических процессах.
- Потоки кислорода на поверхности моря и значение этого обмена в формировании кислородного режима морской среды.
- Потоки углекислого газа на поверхности моря. Изменения величины и направления этого потока. Роль физических и биолого-химических процессов в формировании этого потока.





https://www.geomar.de/typo3temp/pics/III-T2-WP2_c23d3b128f.jpg

Потоки биогенных элементов (азот, фосфор, кремний)

- Биогенные элементы, по определению, это те элементы, которые контролируют (ограничивают) уровень первично-продукционных (фотосинтетических) процессов в морской среде.
- По этой причине углерод и кислород, например, не являются по этой классификации биогенными элементами, хотя участвует во всех без исключения процессах продукции и ассимиляции органического вещества.

Актуальность исследования

Поступление биогенных элементов на морскую поверхность с атмосферными выпадениями может быть одной из причин развития в водоеме интенсивного цветения фитопланктона, изменения соотношения биогенных элементов и видового разнообразия фитопланктона, развития дефицита кислорода.

По этой причине важно знать сколько и каких биогенных элементов поступает на поверхность моря.

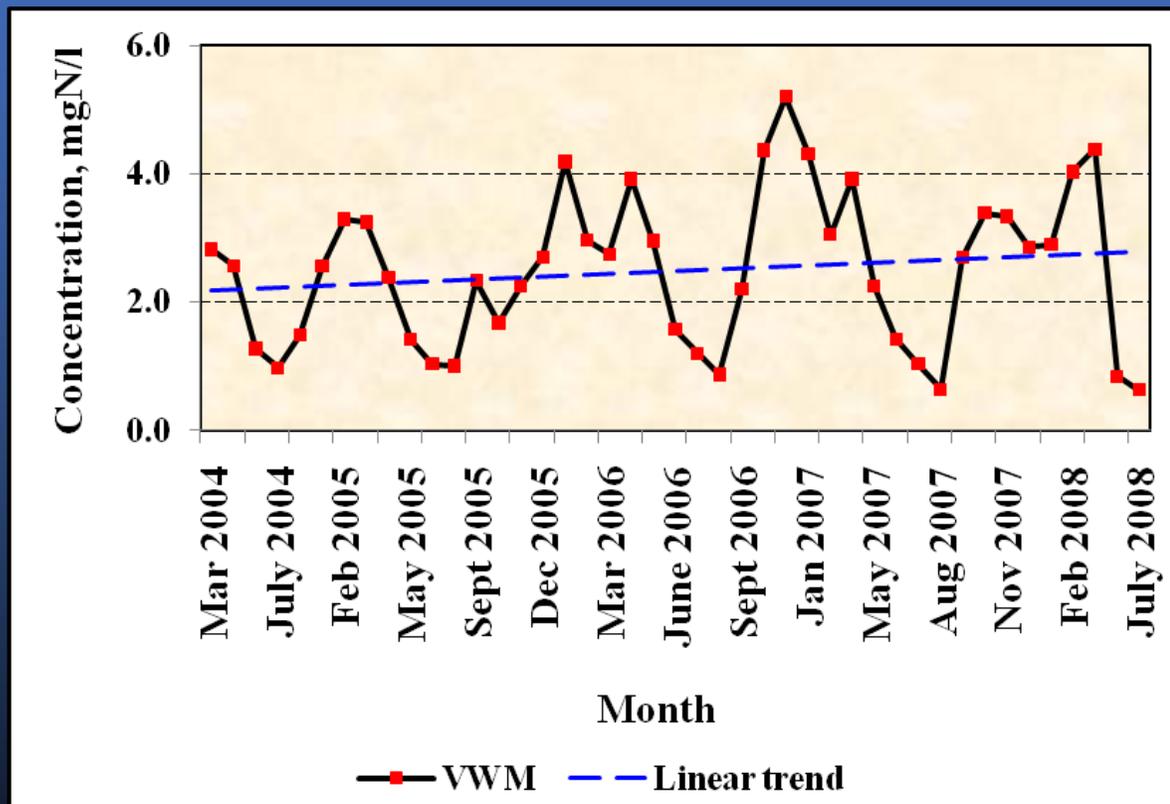
Станция отбора проб атмосферных осадков в г. Севастополе



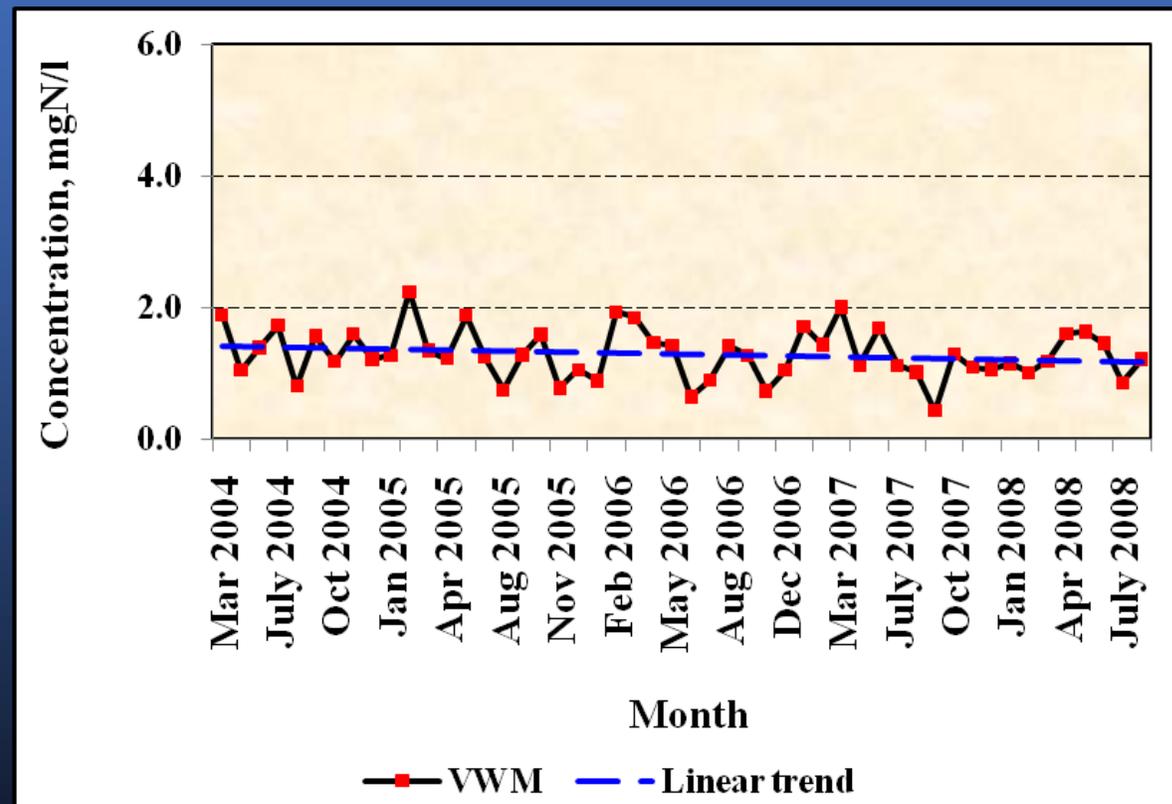
Метеорологическая станция «Севастополь» расположена на Павловском мысу с 1909 года. Станция работает круглосуточно, что позволяет отбирать первые порции атмосферных осадков.

Пробы влажных и сухих выпадений отбирались отдельно.

Примеры рядов наблюдений

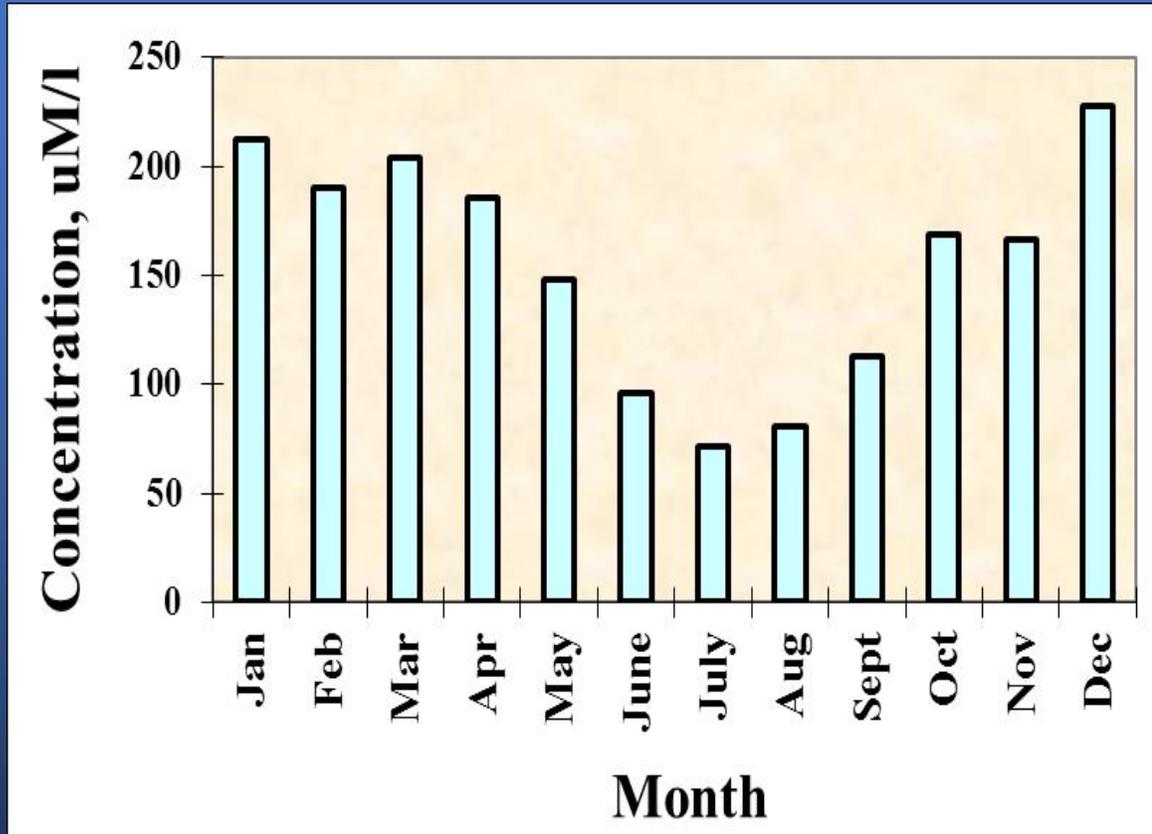


Sevastopol

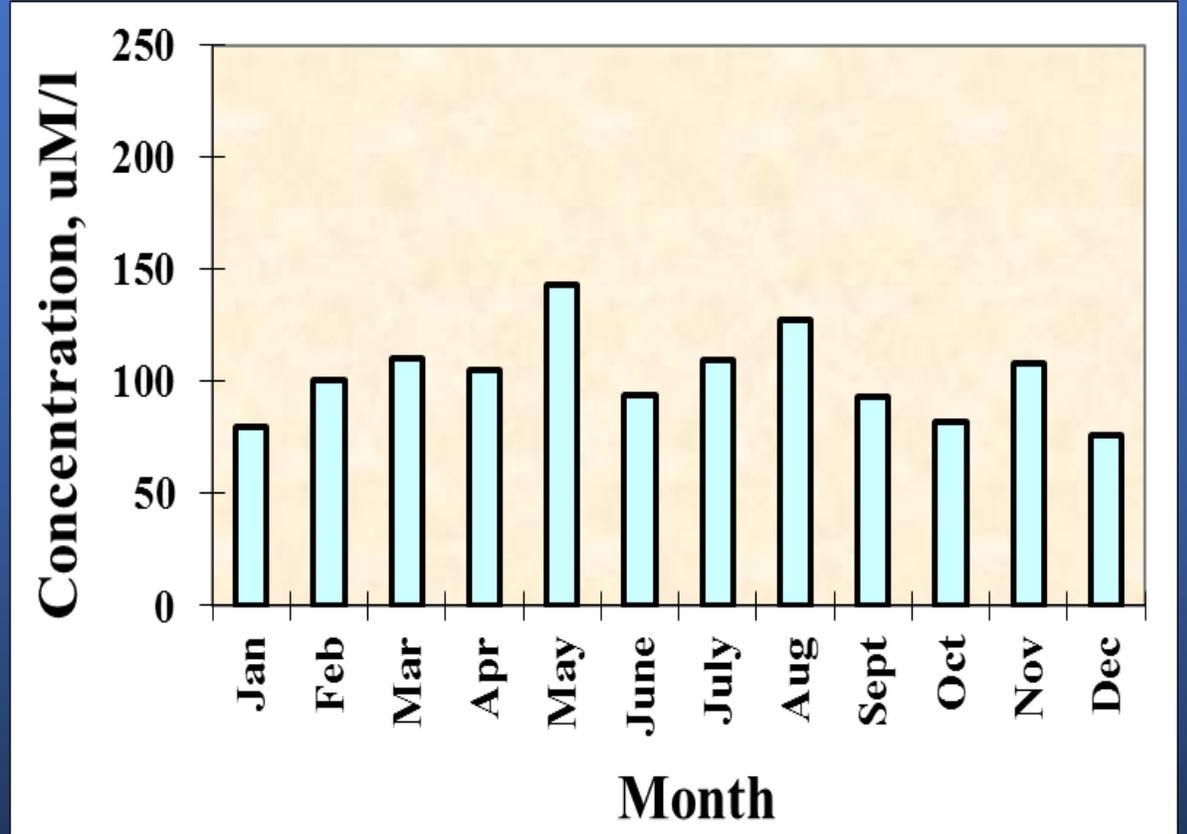


Katsiveli

VOLUME-WEIGHTED MEAN CONCENTRATIONS



Sevastopol



Katsiveli

The summer values were equal for Sevastopol (116 $\mu\text{mol/l}$) and Katsiveli (113 $\mu\text{mol/l}$). However, the winter values for Sevastopol were 2-fold of those for Katsiveli – 195 $\mu\text{mol/l}$ and 93 $\mu\text{mol/l}$ respectively.

Уравнение множественной нелинейной регрессии

$$\begin{aligned} \ln C = & 4.55 \cdot 1.0509 \exp^{-0.065 \cdot Ri} \cdot 0.96 \cdot d^{0.0449} \cdot (0.0009 \cdot f + 0.9282) \times \\ & \times (0.00006 \cdot Vy^3 + 0.0015 \cdot Vy^2 + 0.0032 \cdot Vy + 0.9963) \cdot (-0.0004 \cdot Vx^3 + 0.0003 \cdot Vx^2 - \\ & - 0.0009 \cdot Vx + 0.9946) \cdot (0.0004 \cdot Ta^2 - 0.0109 \cdot Ta + 1.0518), \end{aligned} \quad (1)$$

Ri – количество выпавших осадков, мм;

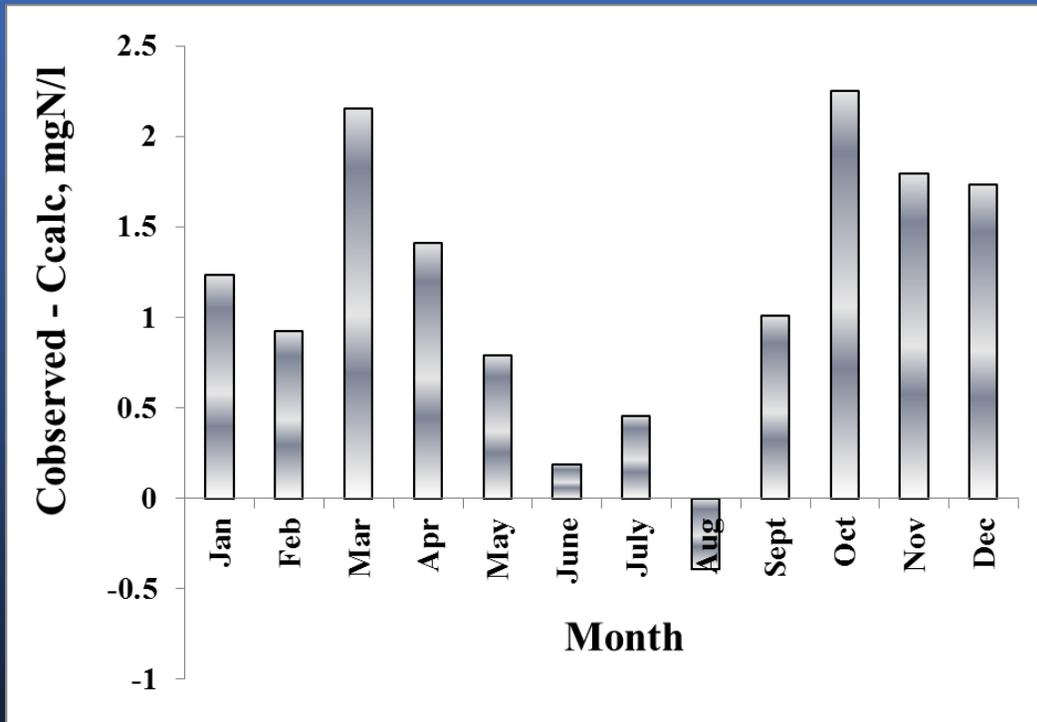
d – количество дней без осадков;

f – относительная влажность воздуха, %

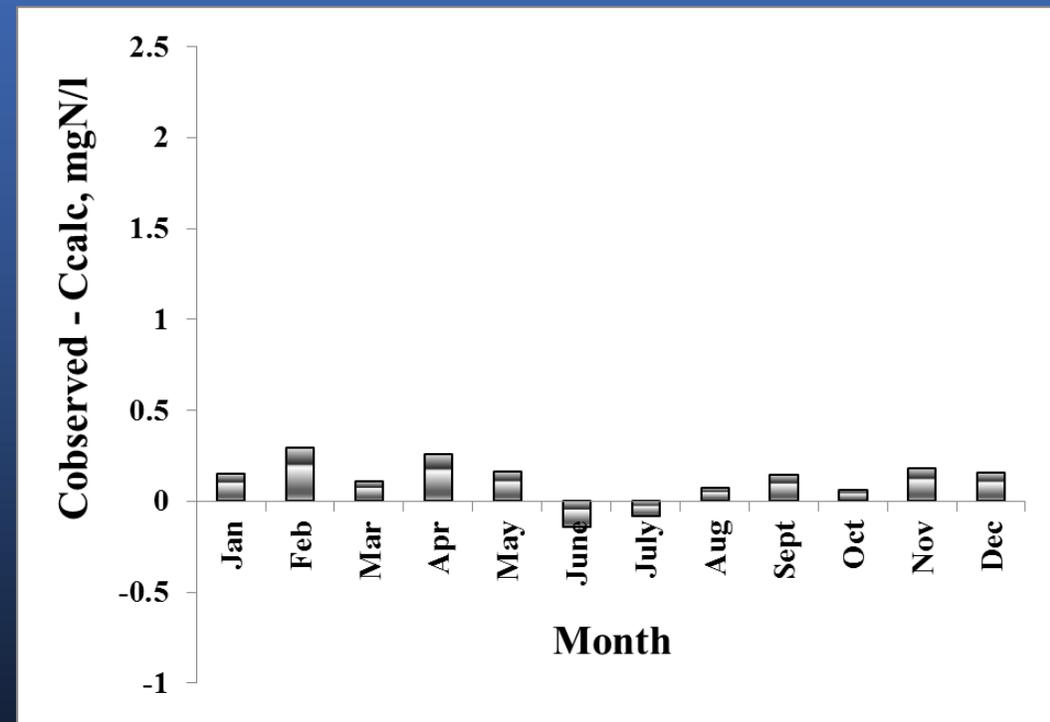
Vy, Vx – векторы направления ветра;

Ta – температура воздуха, °С.

Разница между наблюдаемыми и рассчитываемыми величинам концентрации соединений азота в атмосферных выпадениях

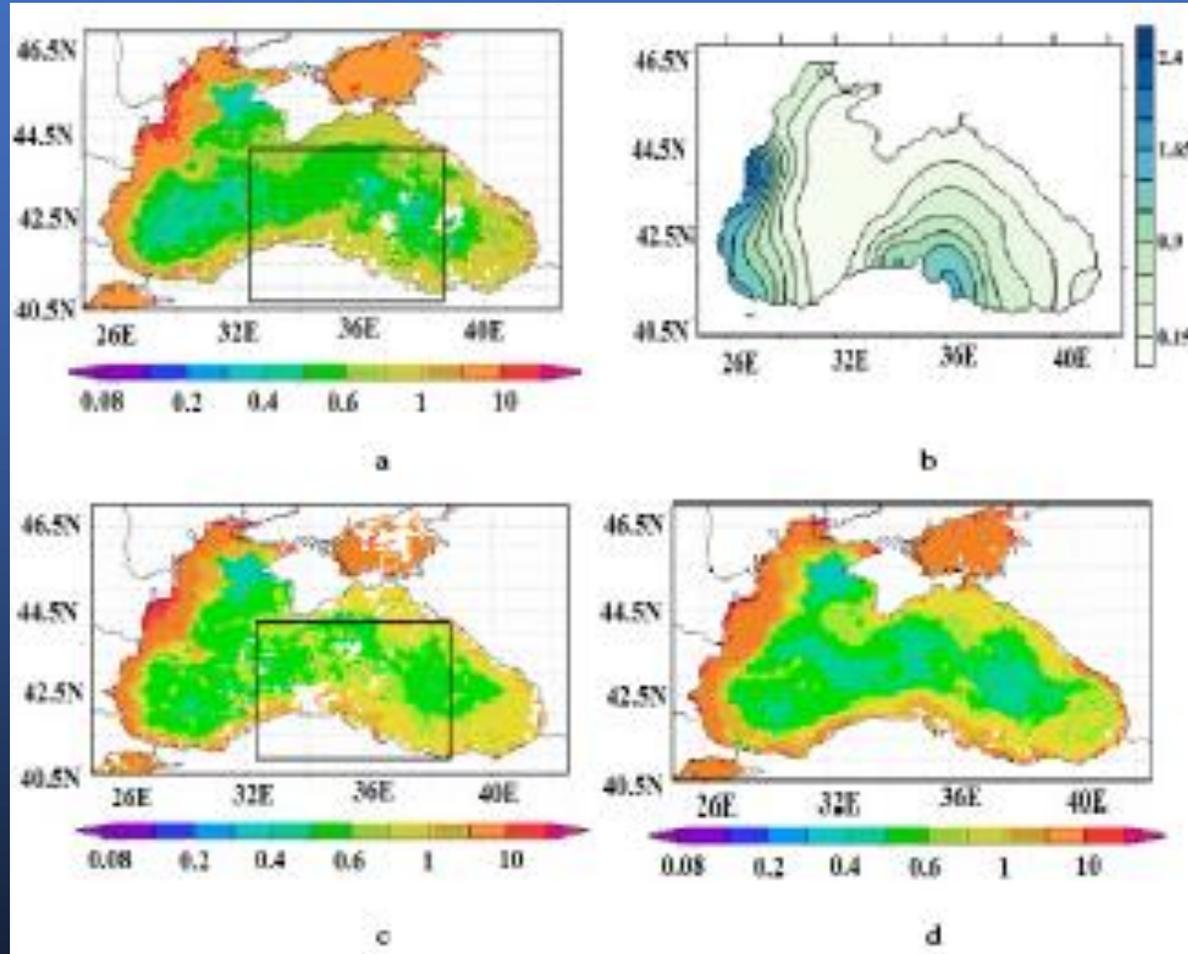


Sevastopol



Katsiveli

Влияние поступления соединений азота из атмосферы



За год в центральную часть моря из атмосферы поступает до 40% от поступления с речным стоком

Характеристики концентраций биогенных элементов в пробах атмосферных осадков

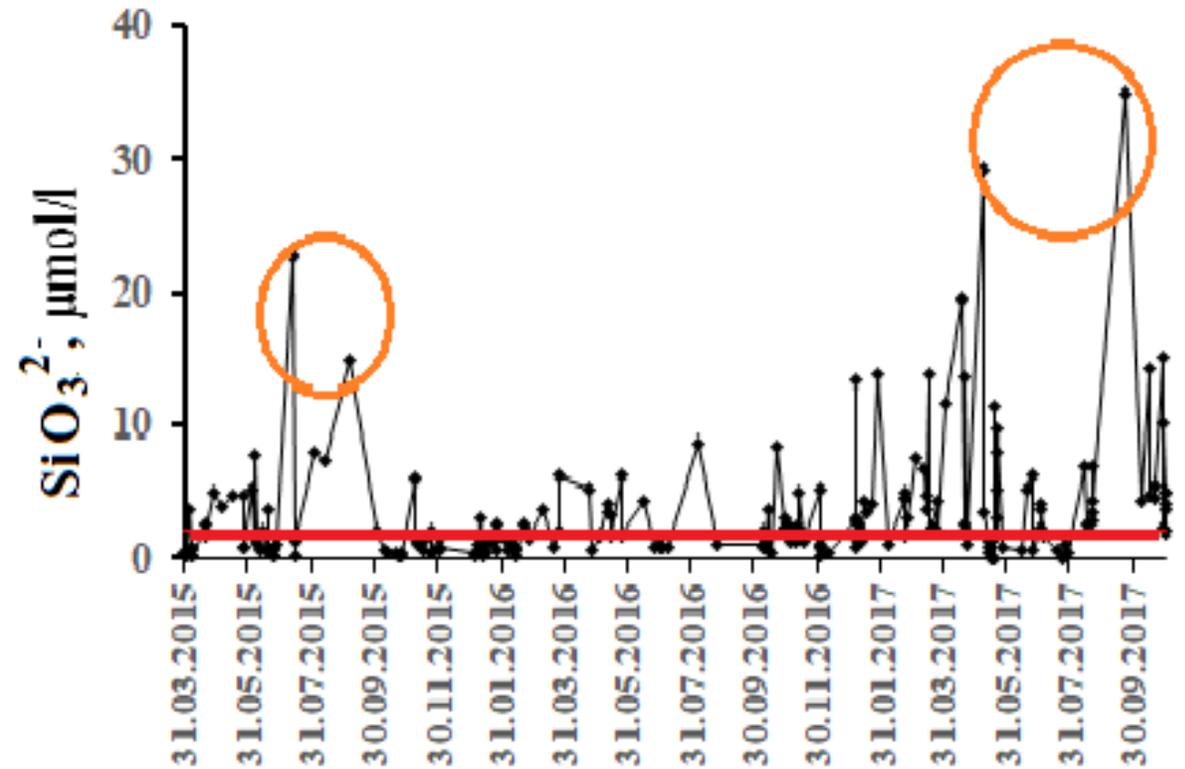
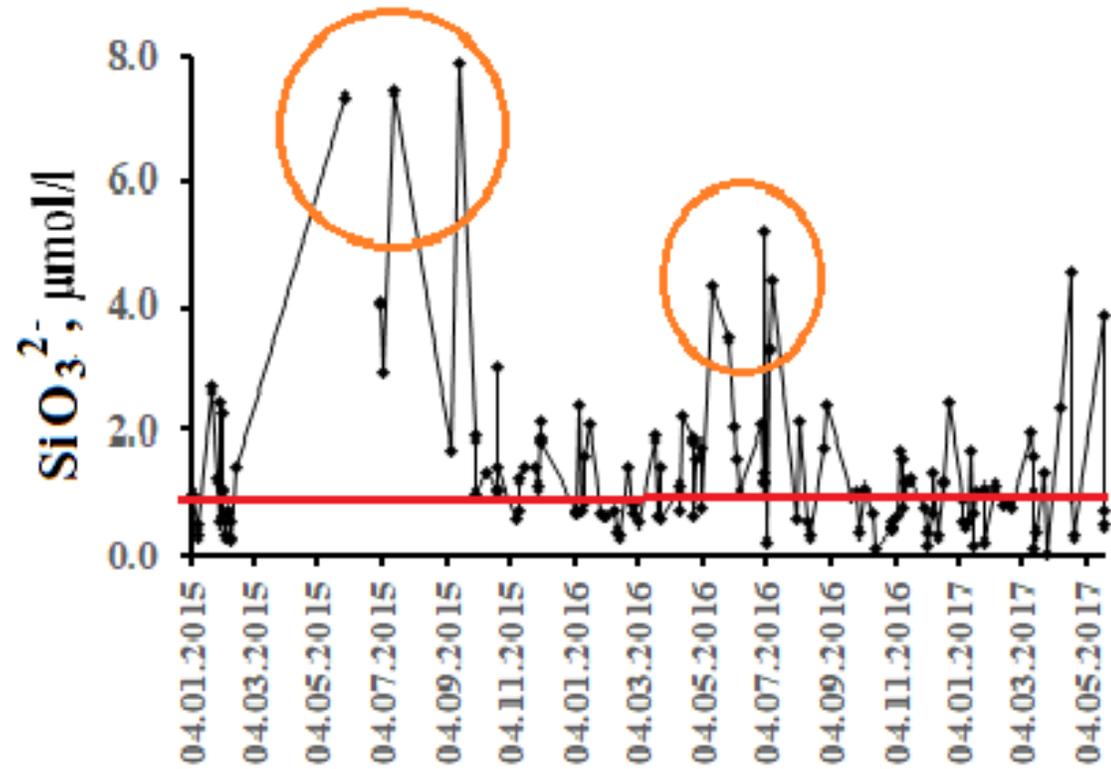
Концентрация, мкмоль/л	Неорганический азот		Фосфаты		Кремнекислота	
	Wet-only sampler	Open sampler	Wet-only sampler	Open sampler	Wet-only sampler	Open sampler
Количество проб	469	437	459	429	461	432
Максимальная	465,85	799,63	18,23	37,12	34,54	36,81
Минимальная	19,51	17,03	0,00	0,00	0,00	0,02
Средневзвешенная	75,58	90,53	0,44	1,31	0,92	2,05
Стандартное отклонение	68,42	97,21	1,73	3,54	3,11	5,13

Уравнение множественной нелинейной регрессии для фосфора и кремния построить не удалось

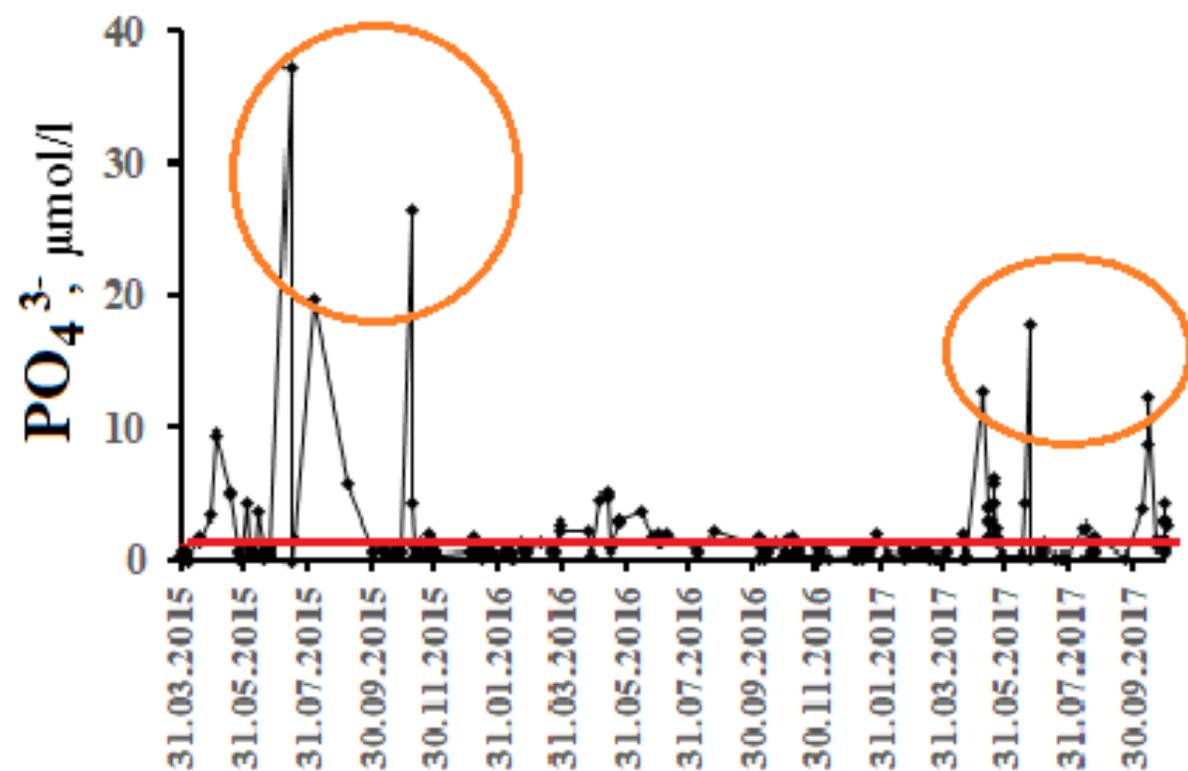
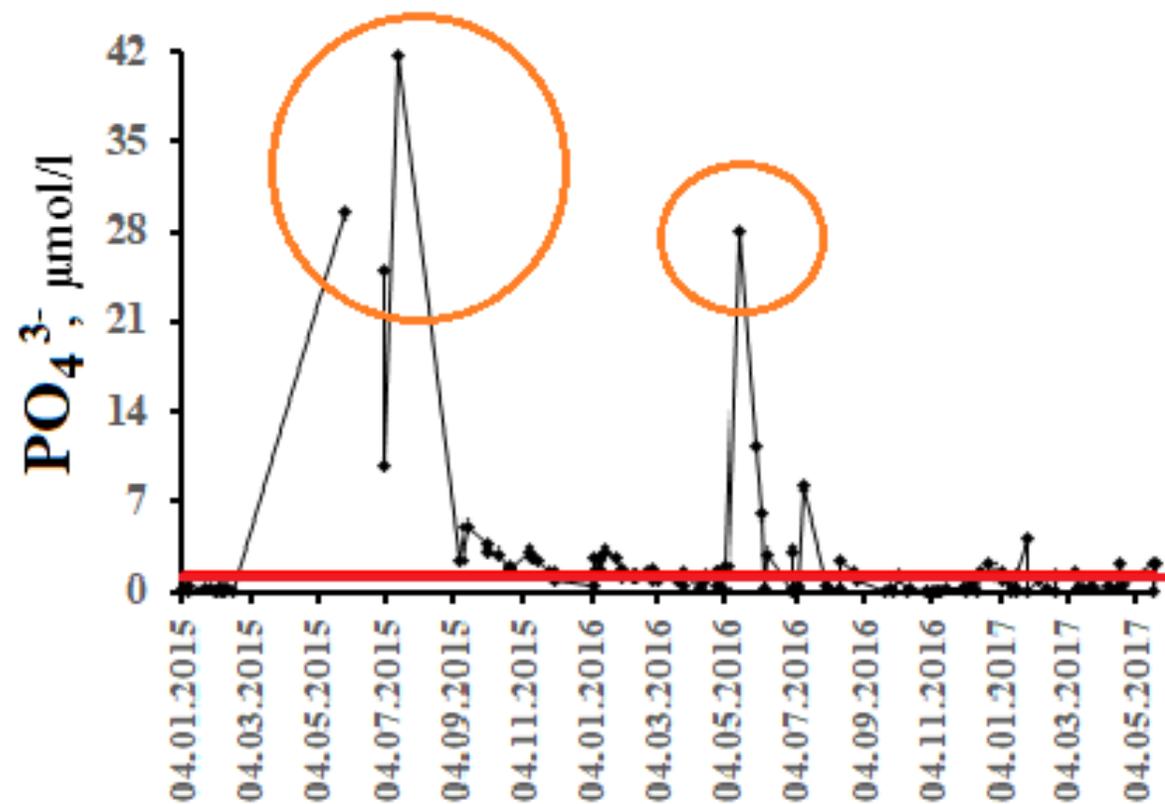
Поток фосфатов и кремнекислоты с атмосферными осадками в среднем за период 2018-2020 гг., ммоль/м² в год

Фосфаты		Кремнекислота	
Wet-only sampler	Open sampler	Wet-only sampler	Open sampler
0,14	0,33	0,34	0,78

Кремний в атмосферных выпадениях

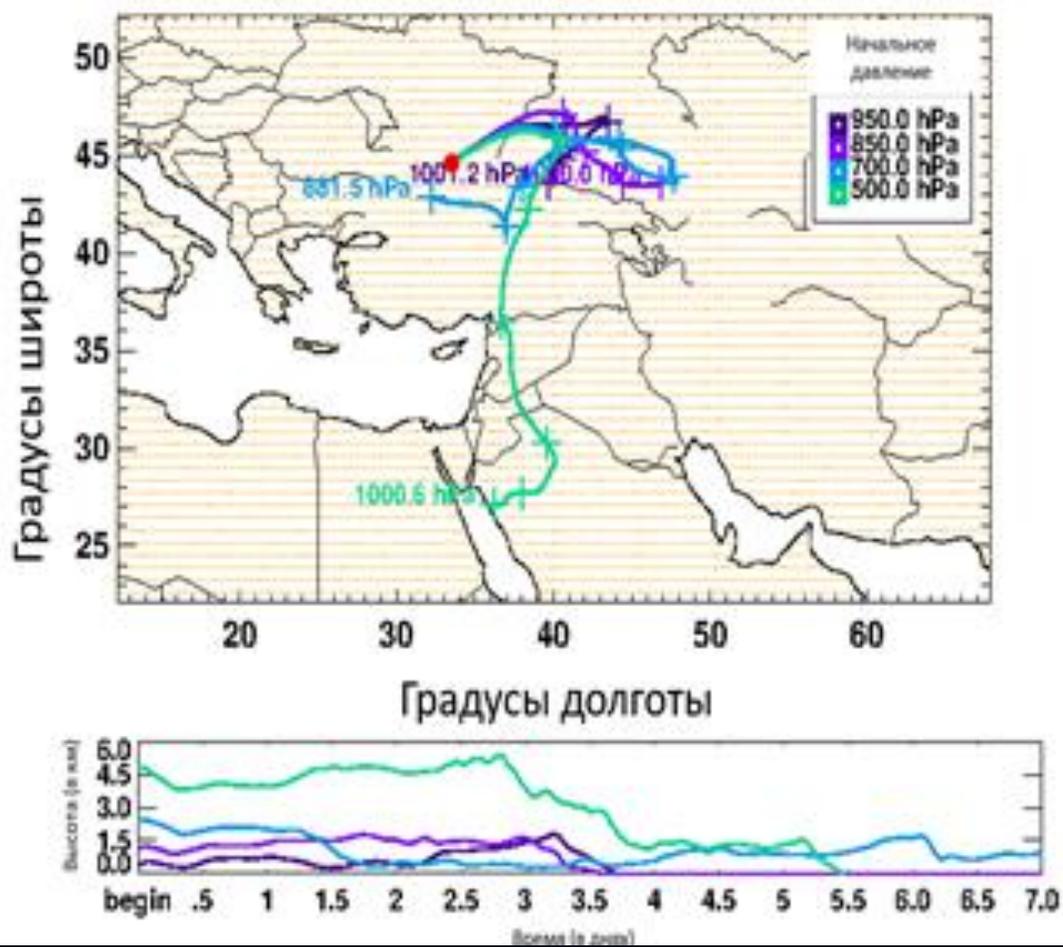


Фосфор в атмосферных выпадениях

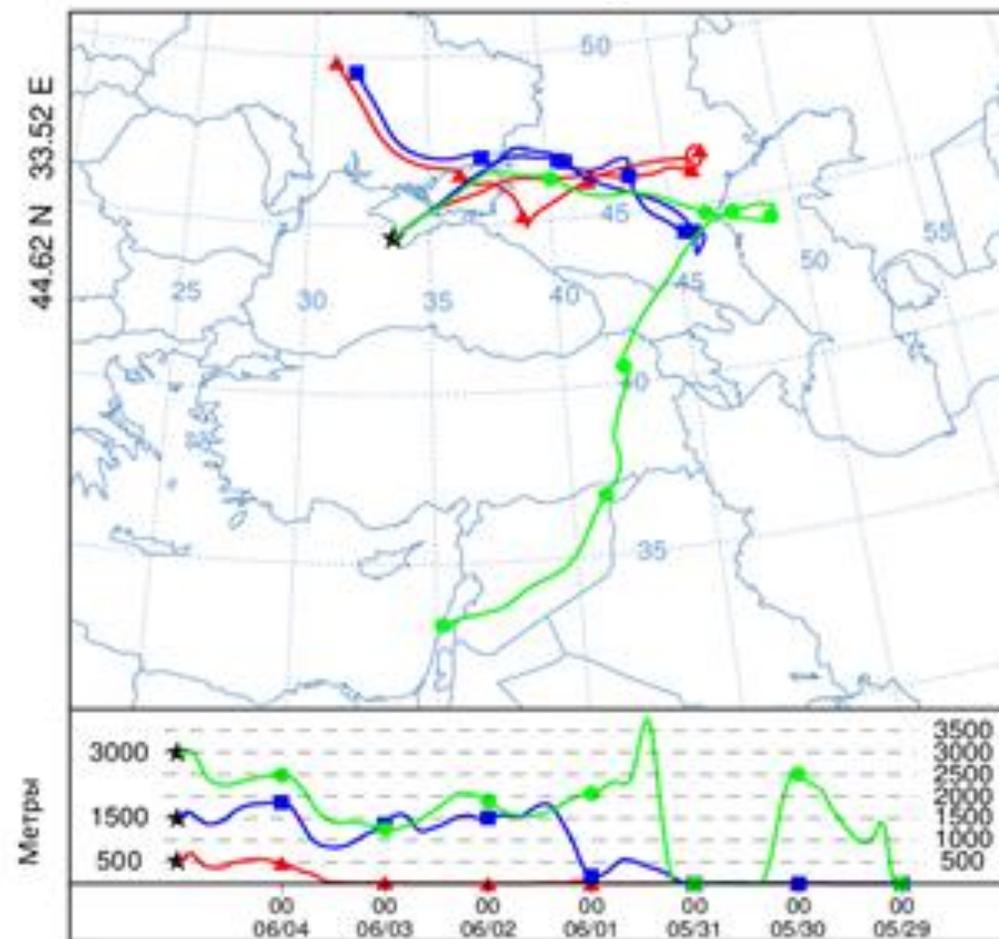


Поступление кремния

Станция Севастополь (красная точка).
Обратная траектория за 2015-06-05

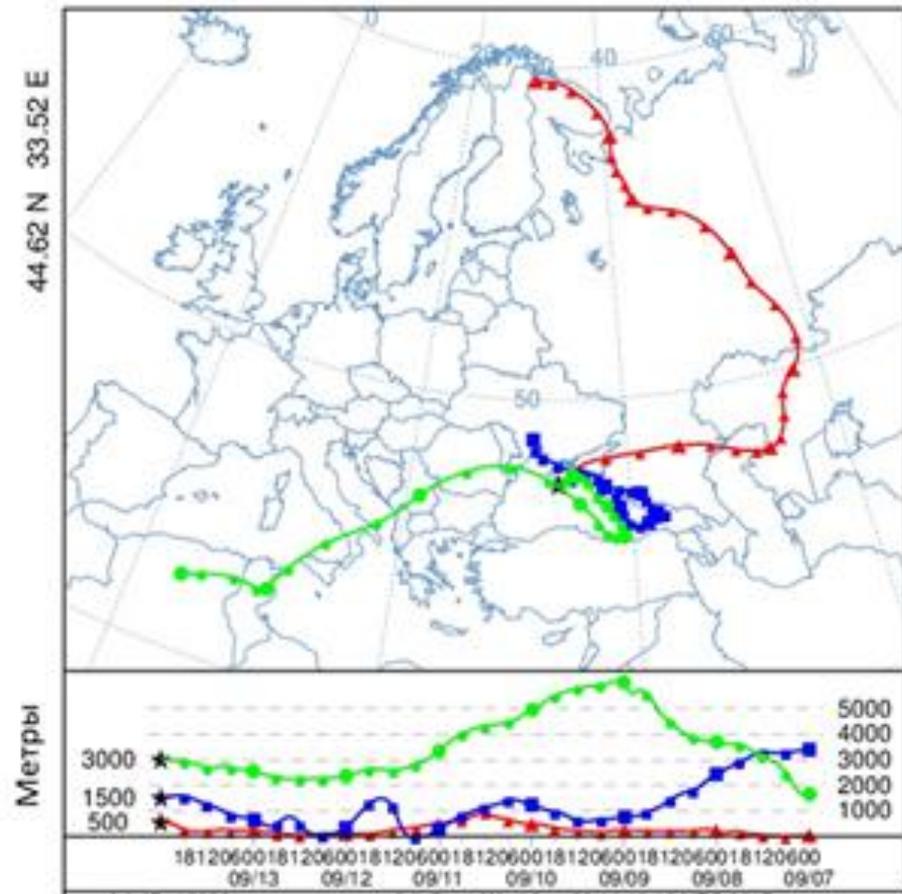


Модель HYSPLIT
Обратная траектория 05-06-2015

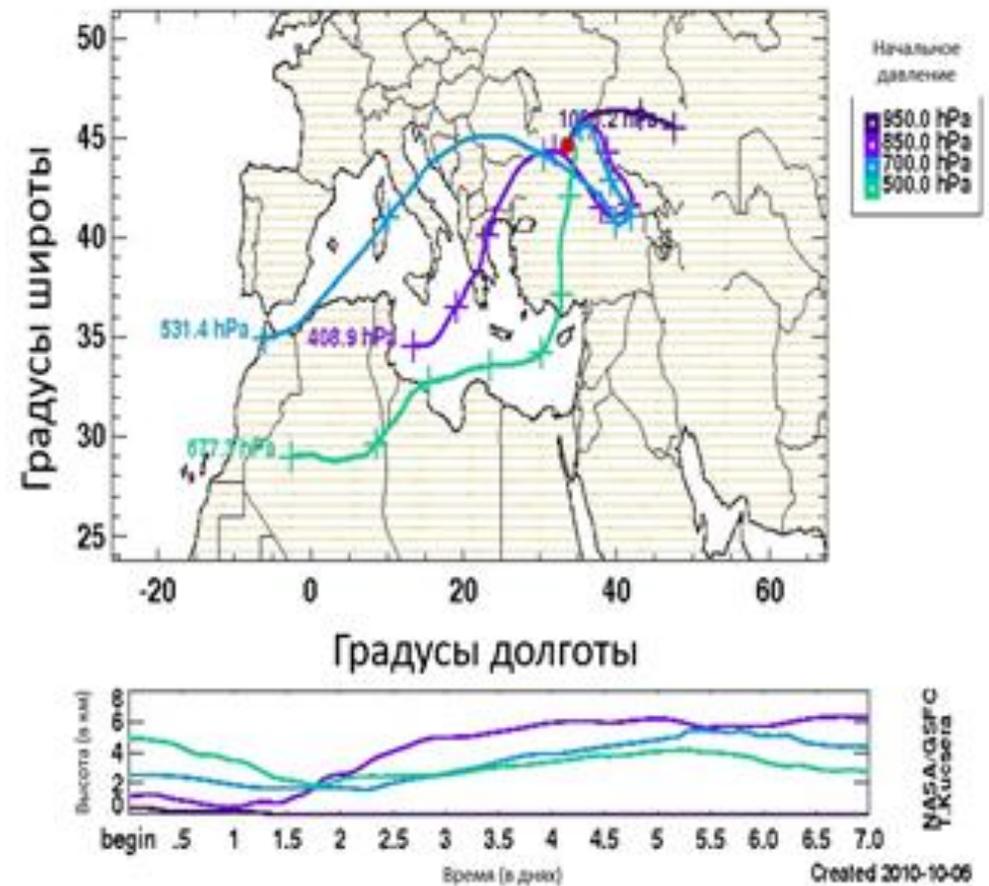


Поступление фосфора

Модель HYSPLIT
Обратная траектория 14-09-2010



Станция Севастополь (красная точка).
Обратная траектория за 2010-09-14



Сезонные и средние значения соотношения N : P : Si в атмосферных выпадениях

	Севастополь
Зима	159 : 1 : 2.0
Весна	160 : 1 : 2.3
Лето	188 : 1 : 2.4
Осень	172 : 1 : 2.3
2015-2020	167 : 1 : 2.2
Фитопланктон	16 : 1 : 0.8

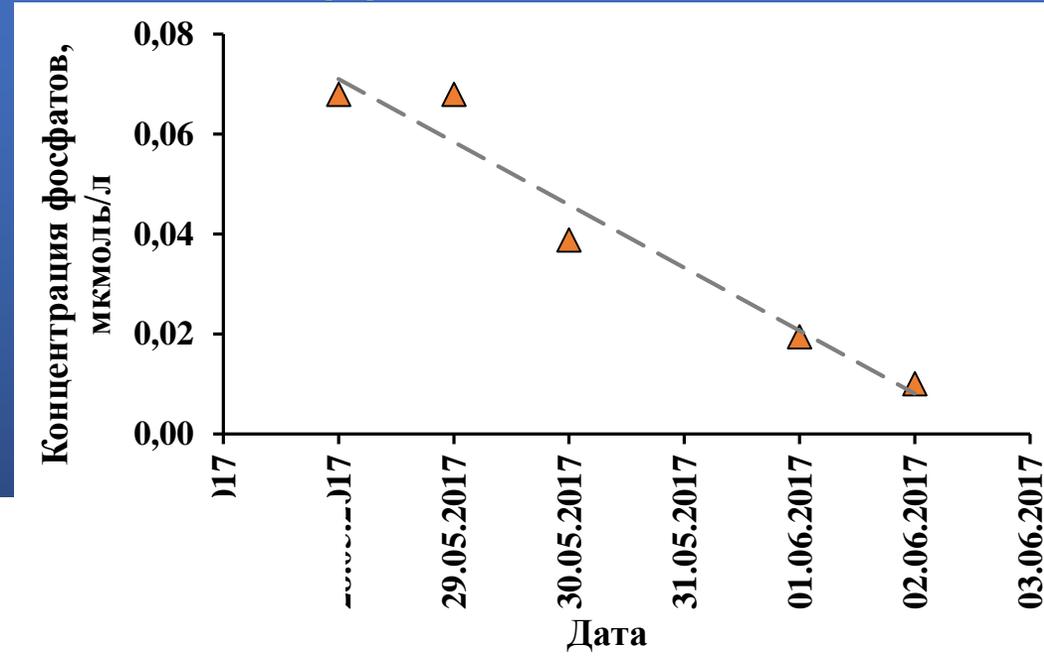
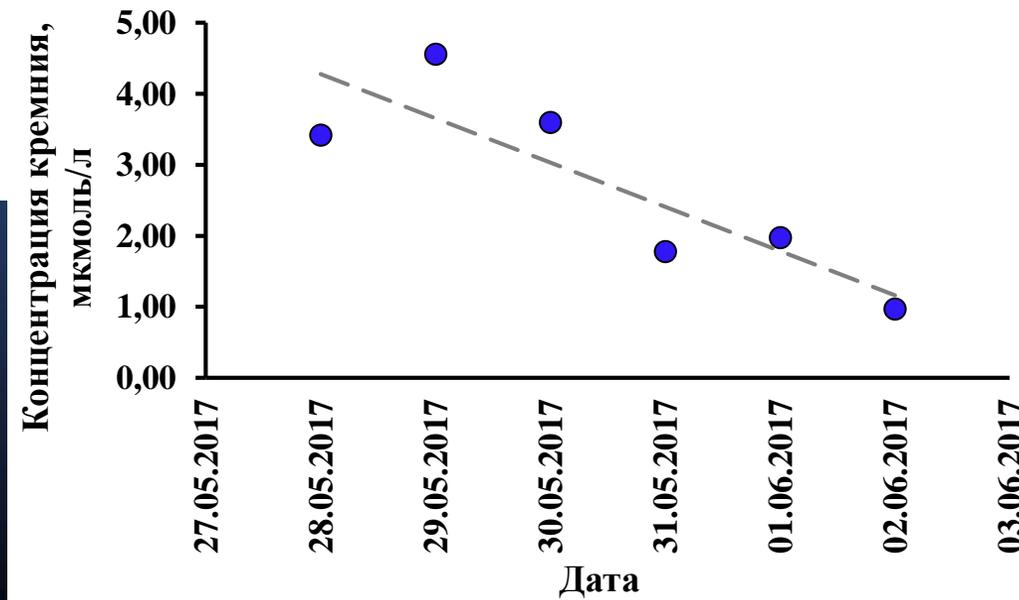
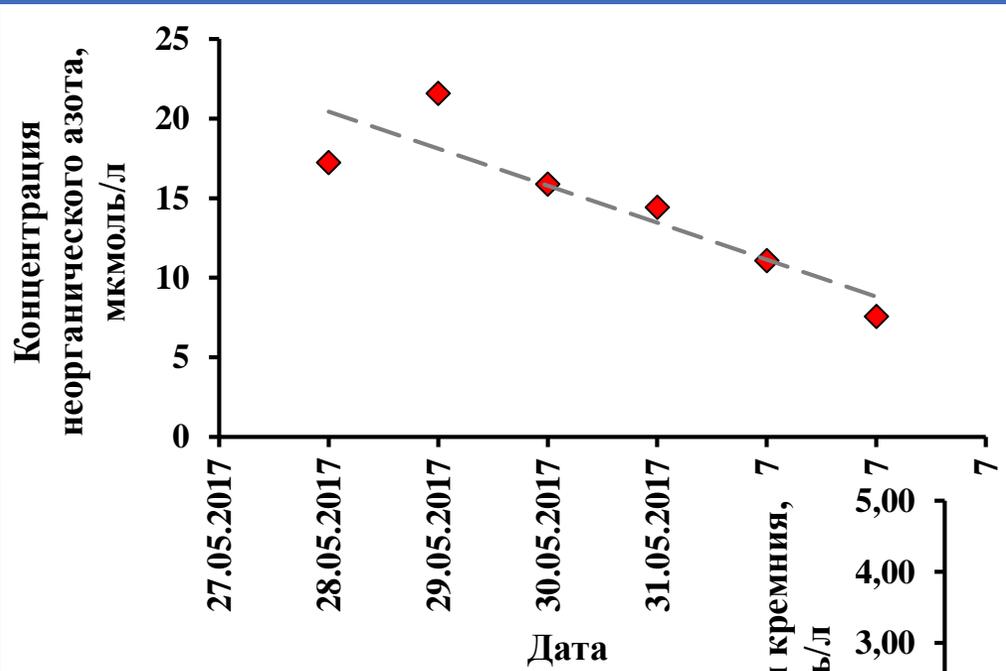
Вклад различных источников поступления биогенных элементов в их годовой бюджет в прибрежных районах

	Вынос с реками, т/год	Поступает со сточными водами, т/год	Поток с атмосферными осадками, т/год
Соединения азота	7594 (82%)	1478 (16%)	94,11 (1%)
Фосфаты	171 (35,5%)	308 (64%)	1,27 (0,5%)

Вклад единичных случаев выпадения атмосферных осадков в суточное поступление

	Вынос с реками, т/сут	Поступает со сточными водами, т/сут	Поток с атмосферными осадками, т/сут
Соединения азота	29,5 (66%)	4 (9%)	10,9 (25%)
Фосфаты	1,9 (47%)	0,8 (20%)	1,34 (33%)

Изменение содержания биогенных элементов в поверхностном слое Севастопольской бухты после выпадения атмосферных осадков



Влияние на уровень кислорода в придонном слое морской воды

	Неорганический азот (годовое поступление)	Неорганический азот (суточное поступление)
Поток азота	31,1 ммоль·м ⁻² ·год ⁻¹	3,6 ммоль·м ⁻² ·сут ⁻¹
Расход кислорода	268 ммоль О·м ⁻² ·год ⁻¹	31,05 ммоль О·м ⁻² ·сут ⁻¹
Доп расход O₂ в % от его продукции	1,5 %	78 %

Заключение по биогенным элементам

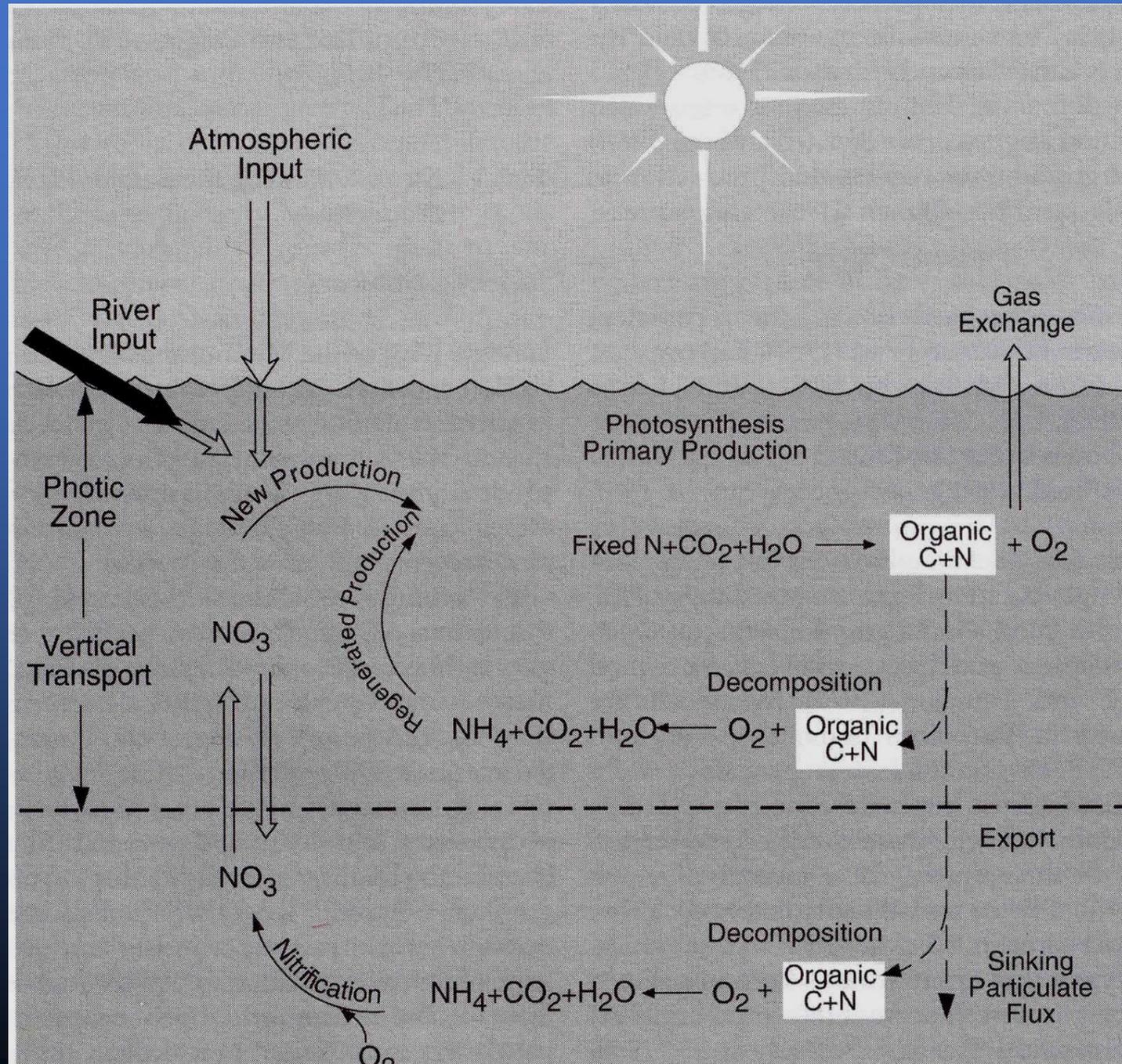
Воды Черного моря подвержены высокой антропогенной нагрузке. При этом атмосферные осадки играют существенную роль в дополнительном поступлении биогенных элементов как в глубоководные, так и прибрежные районы моря.

Особенно явно это проявляется на небольших (синоптических) масштабах времени, особенно в летний период, когда роль основного источника поступления биогенных элементов – речных вод – становится меньше за счет сезонного изменения объема речного стока.

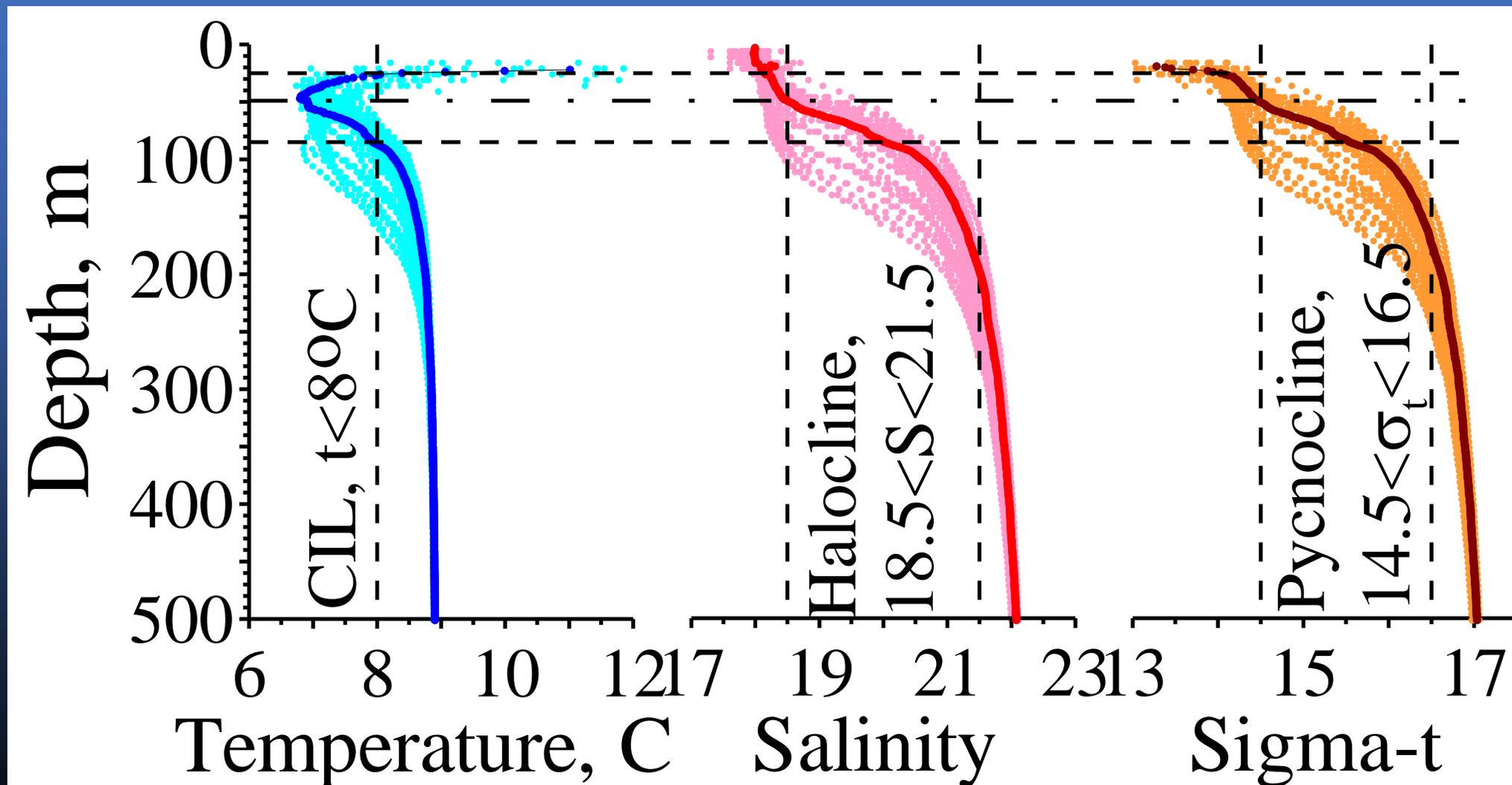
Заключение

Поток биогенных элементов с атмосферными выпадениями изменяет соотношение N:P:Si в поверхностном слое Черного моря и приводит к значительному дополнительному расходованию кислорода на окисление органического вещества.

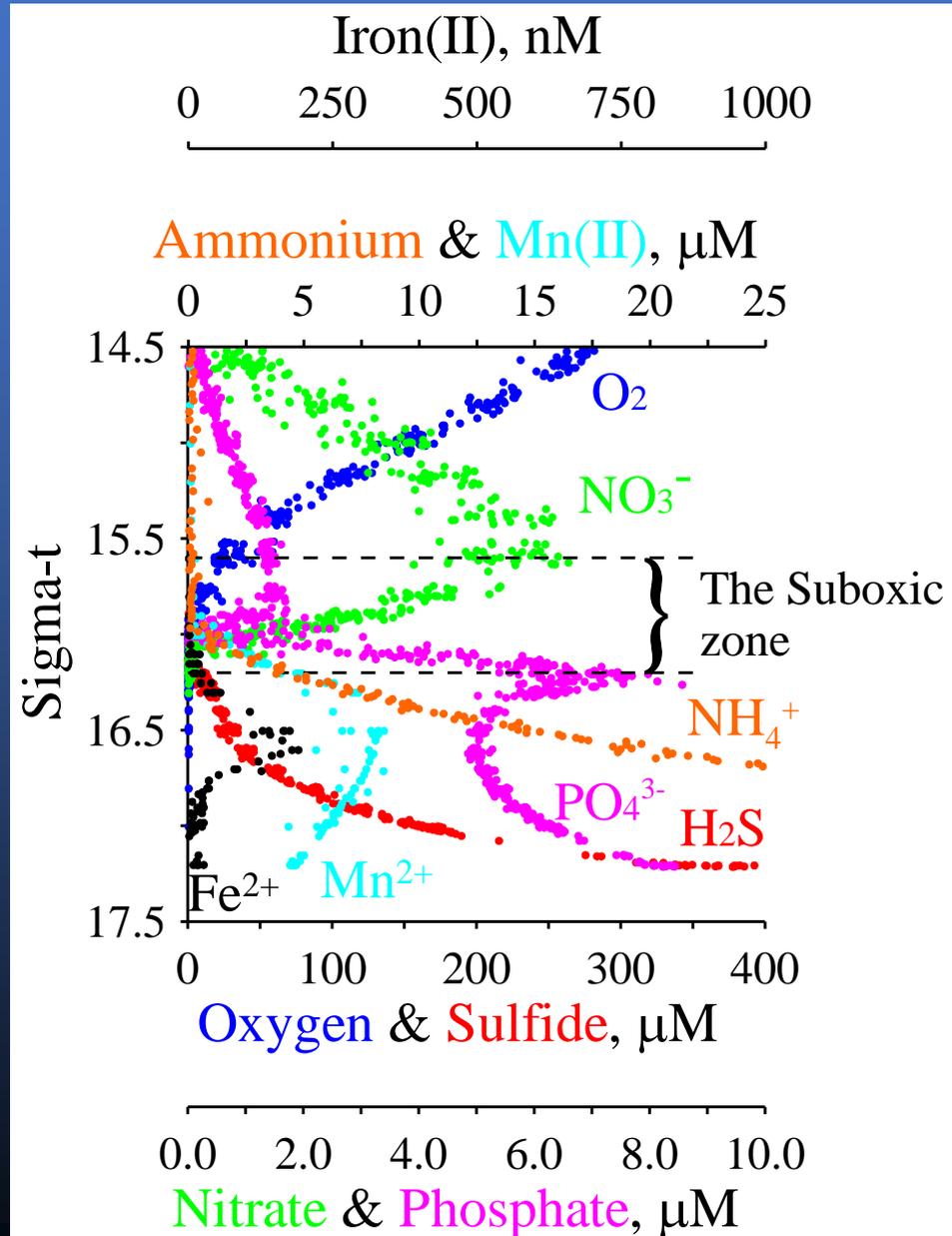
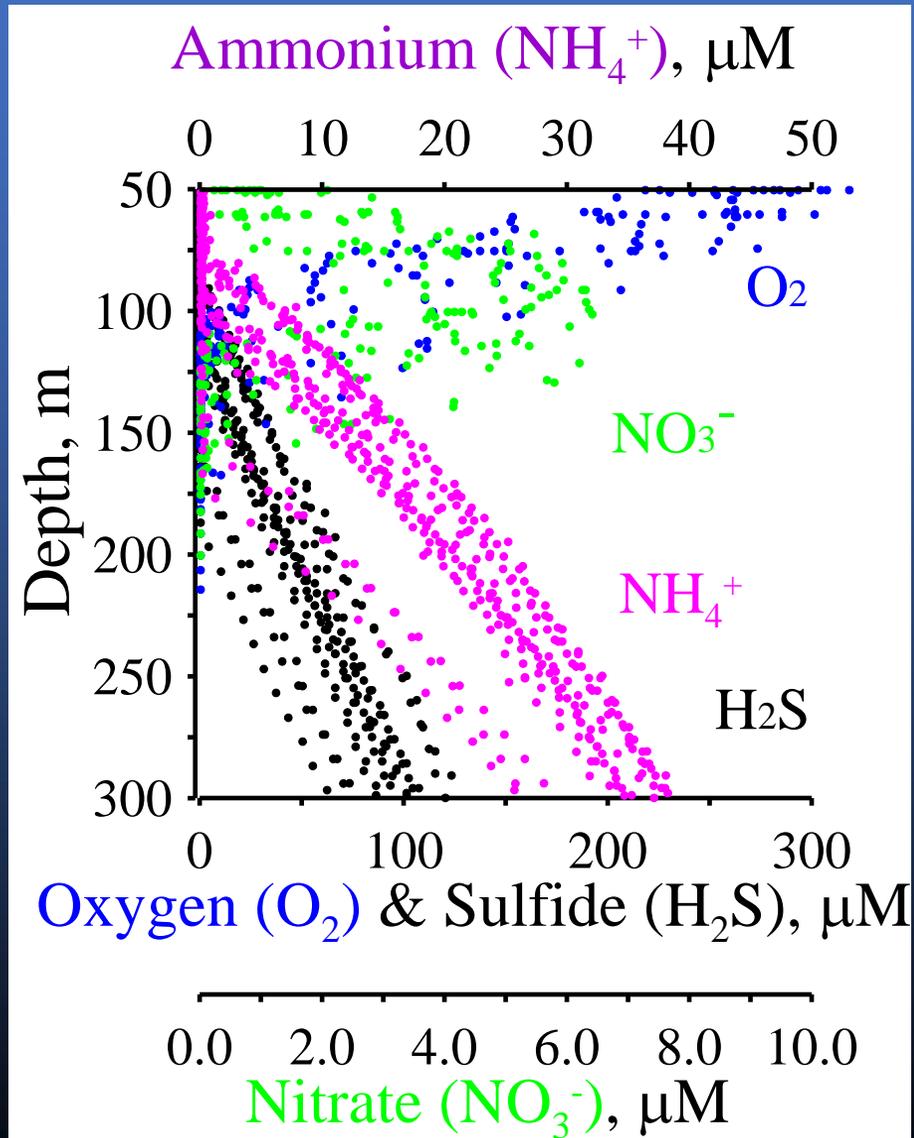
Кислород



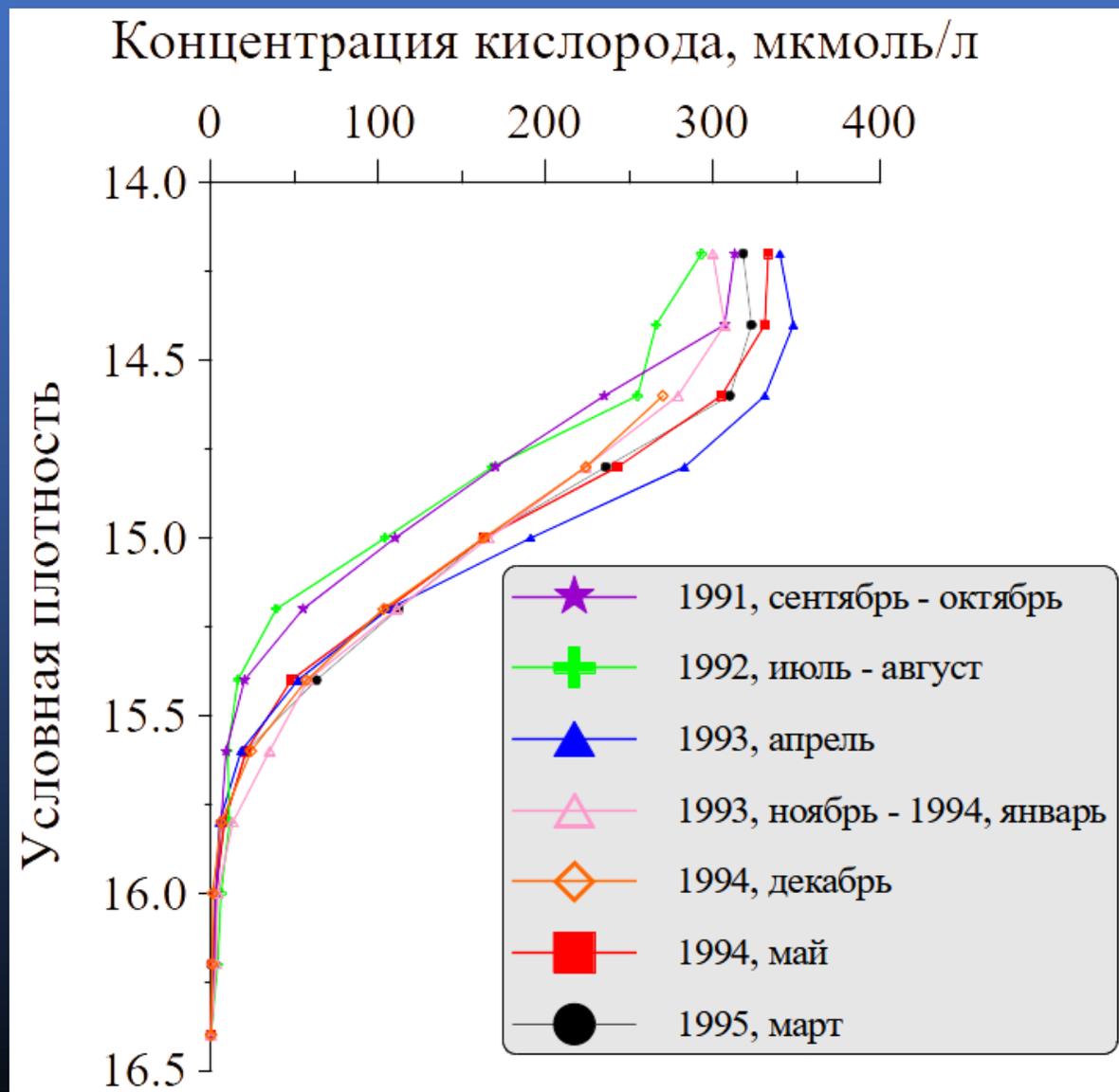
Термохалинная структура



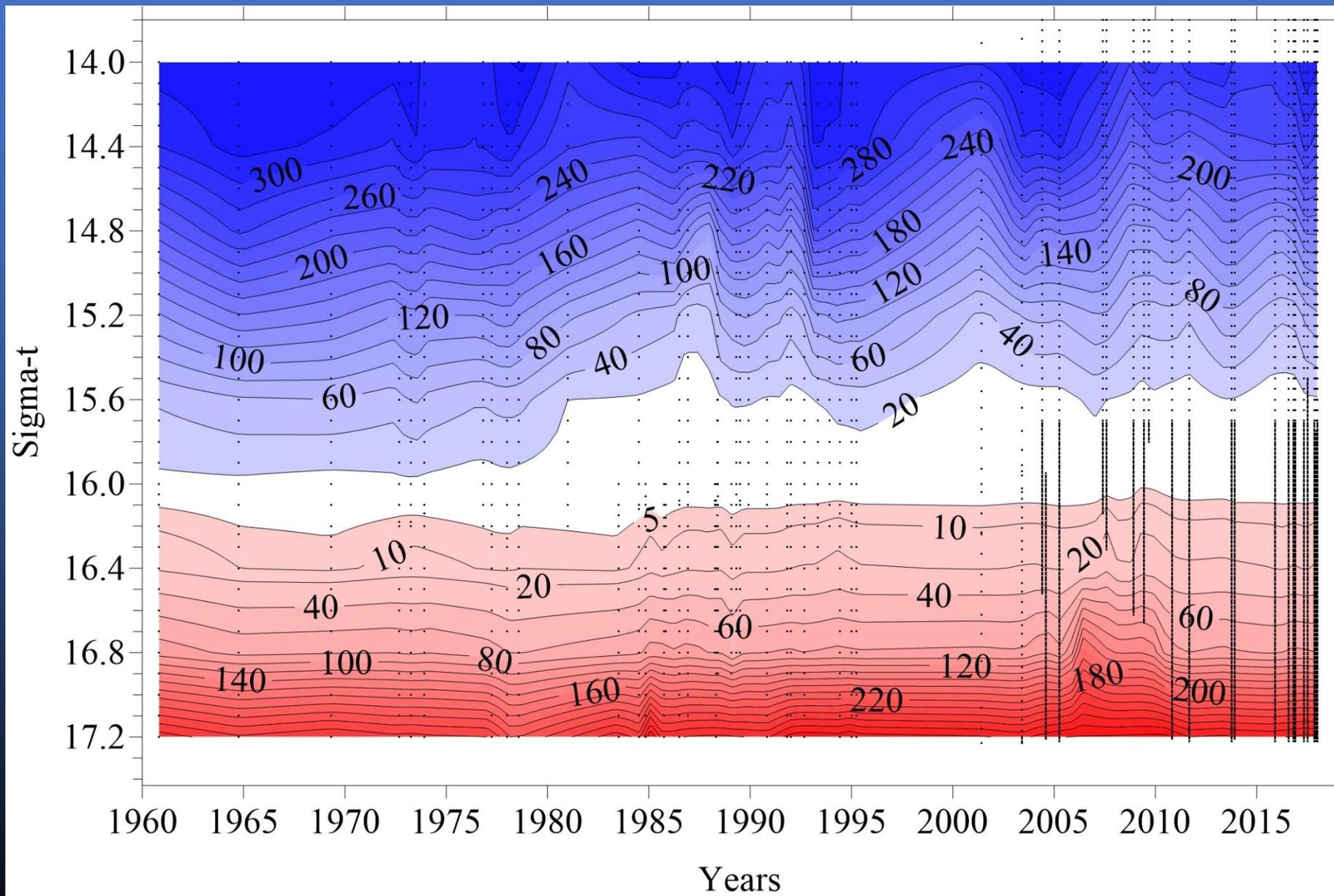
Depth and Sigma-t scales



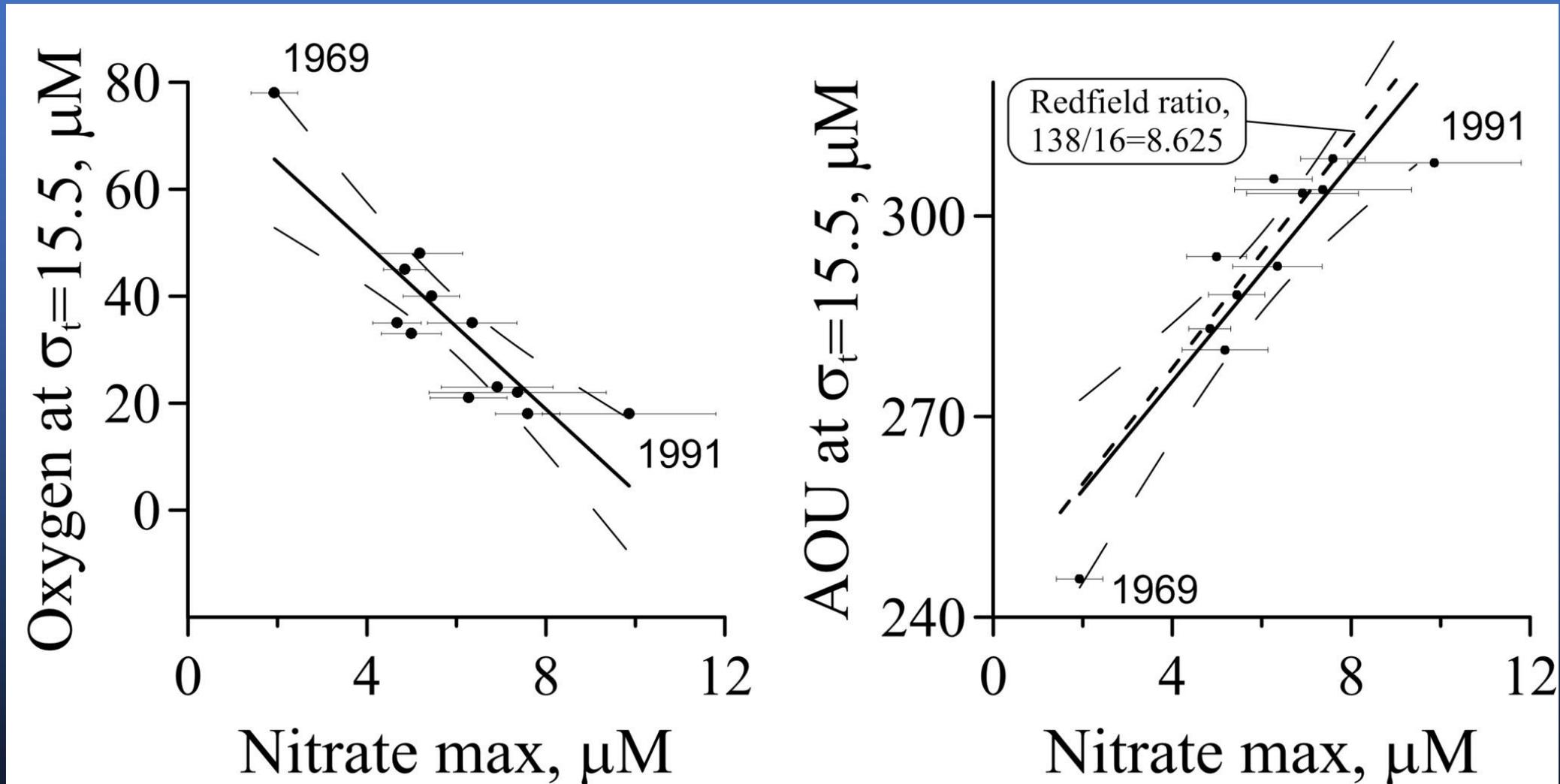
Вертикальный профиль и потоки кислорода



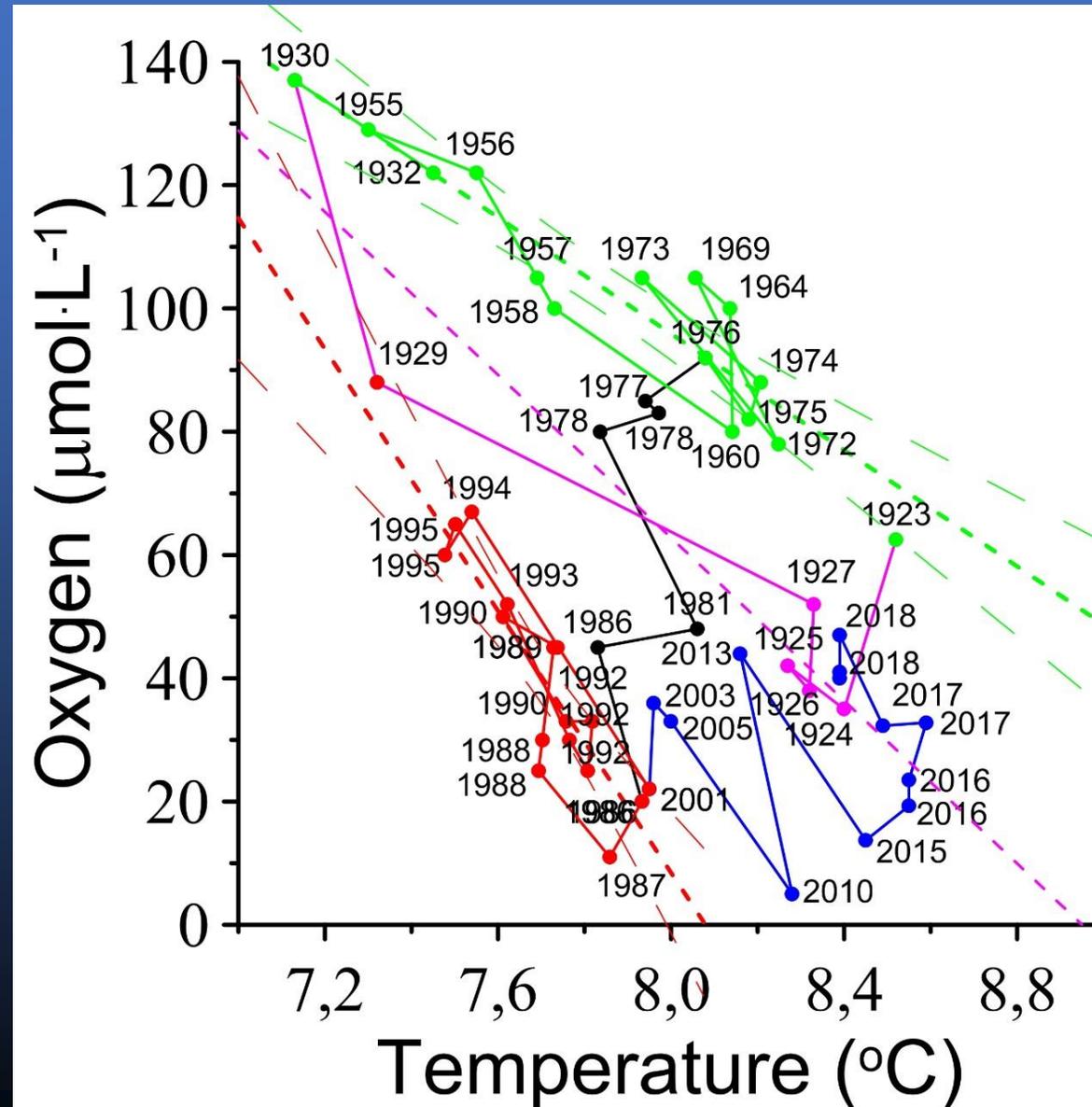
Кислород и сероводород



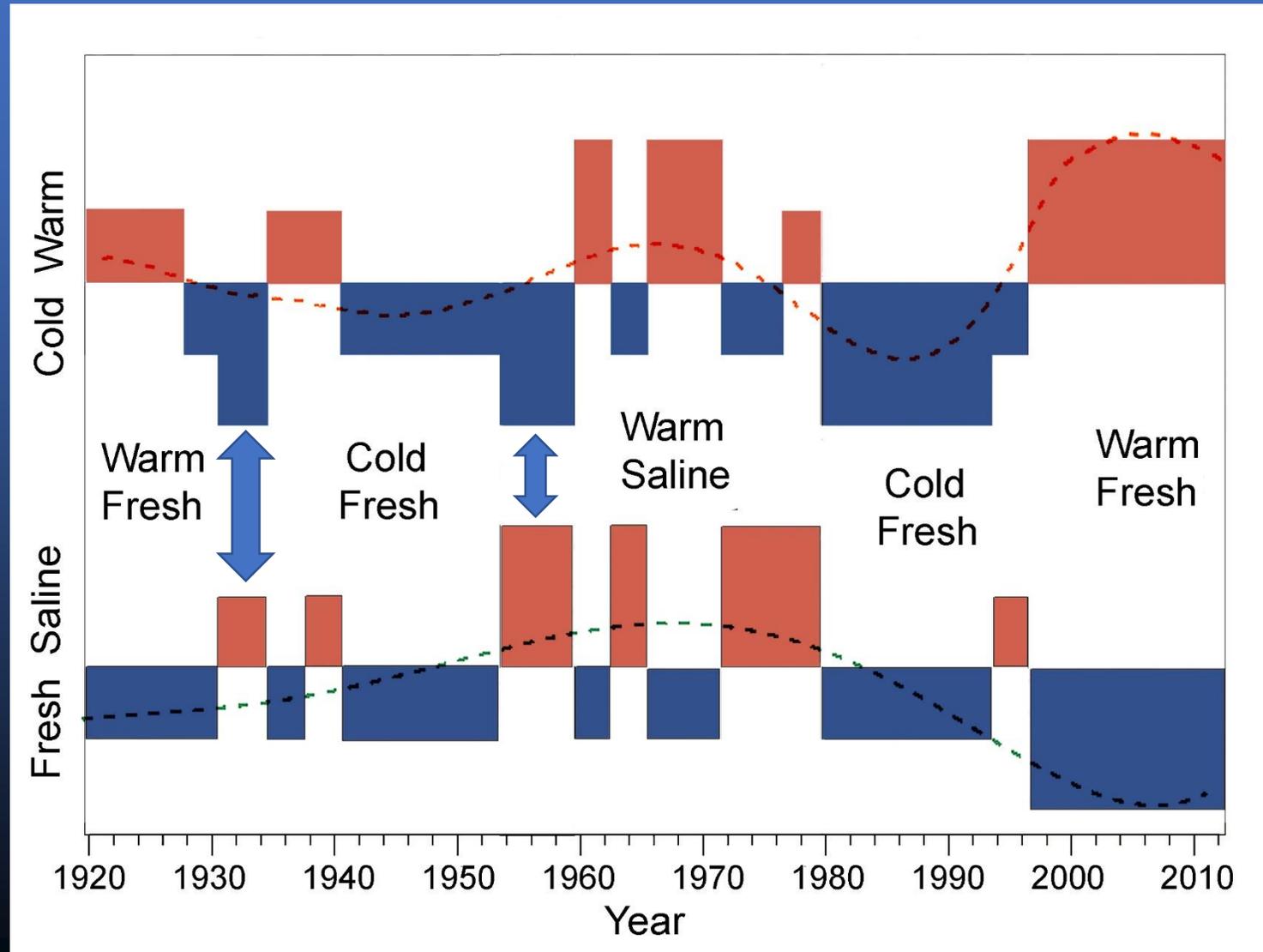
Oxygen, Nitrate, AOU



Oxygen vs. Temperature at $\sigma_t=15.4$



Периоды потепления/похолодания и распреснения/осолонения поверхностных вод моря



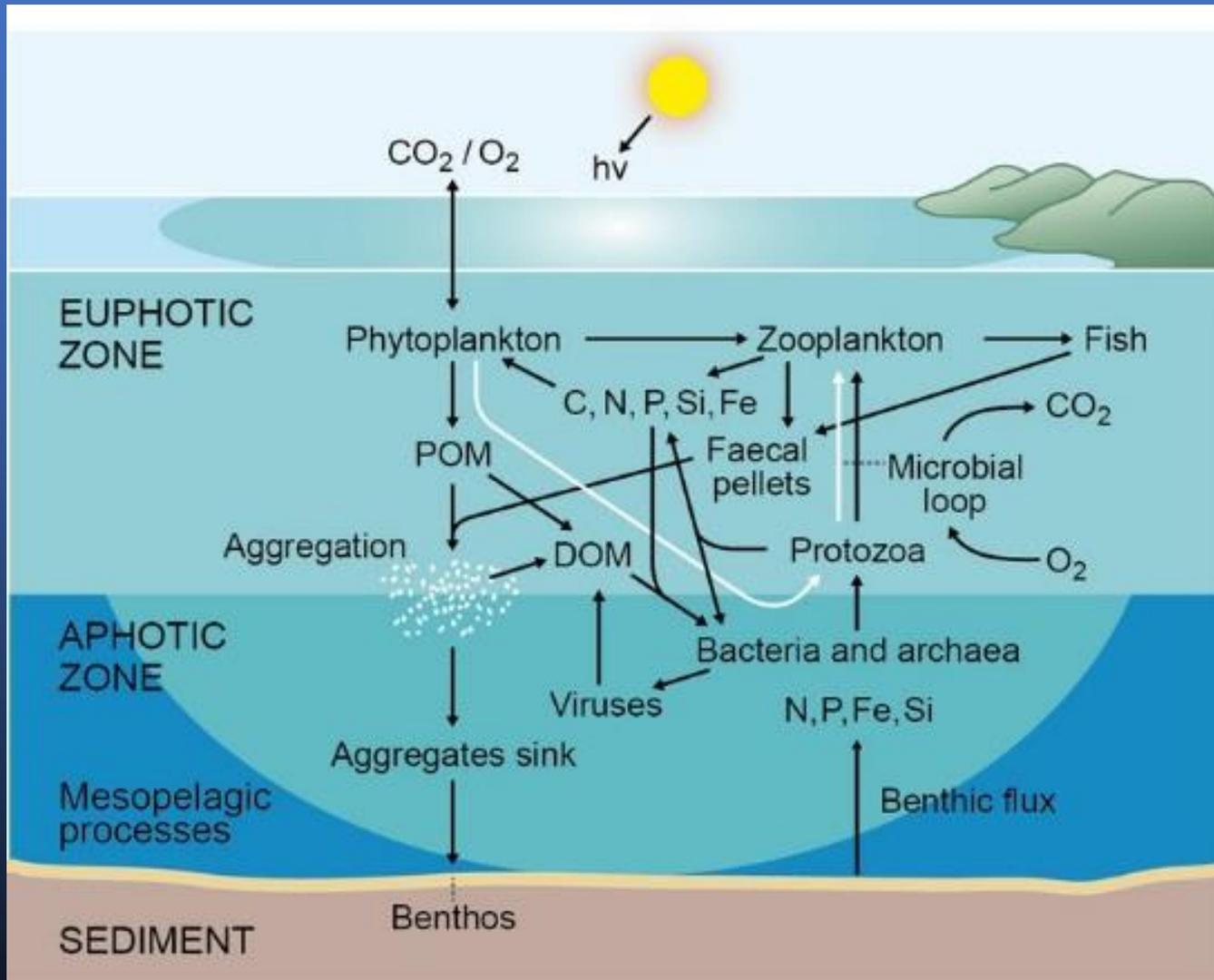
Заключение по кислороду

- Содержание и поток кислорода в поверхностном слое моря определяется обменом с атмосферой и растворимостью кислорода в зависимости от температуры. Процессы фотосинтеза играют незначительную роль в бюджете кислорода в поверхностном слое вод.
- Содержание кислорода в более глубоких слоях вод определяется соотношением физического потока кислорода и скоростью его потребления в биогеохимических процессах. Скорость потребления зависит от скорости фотосинтетических процессов, а поток кислорода вод зависит как от его содержания в верхних слоях вод, так и от термохалинной стратификации.

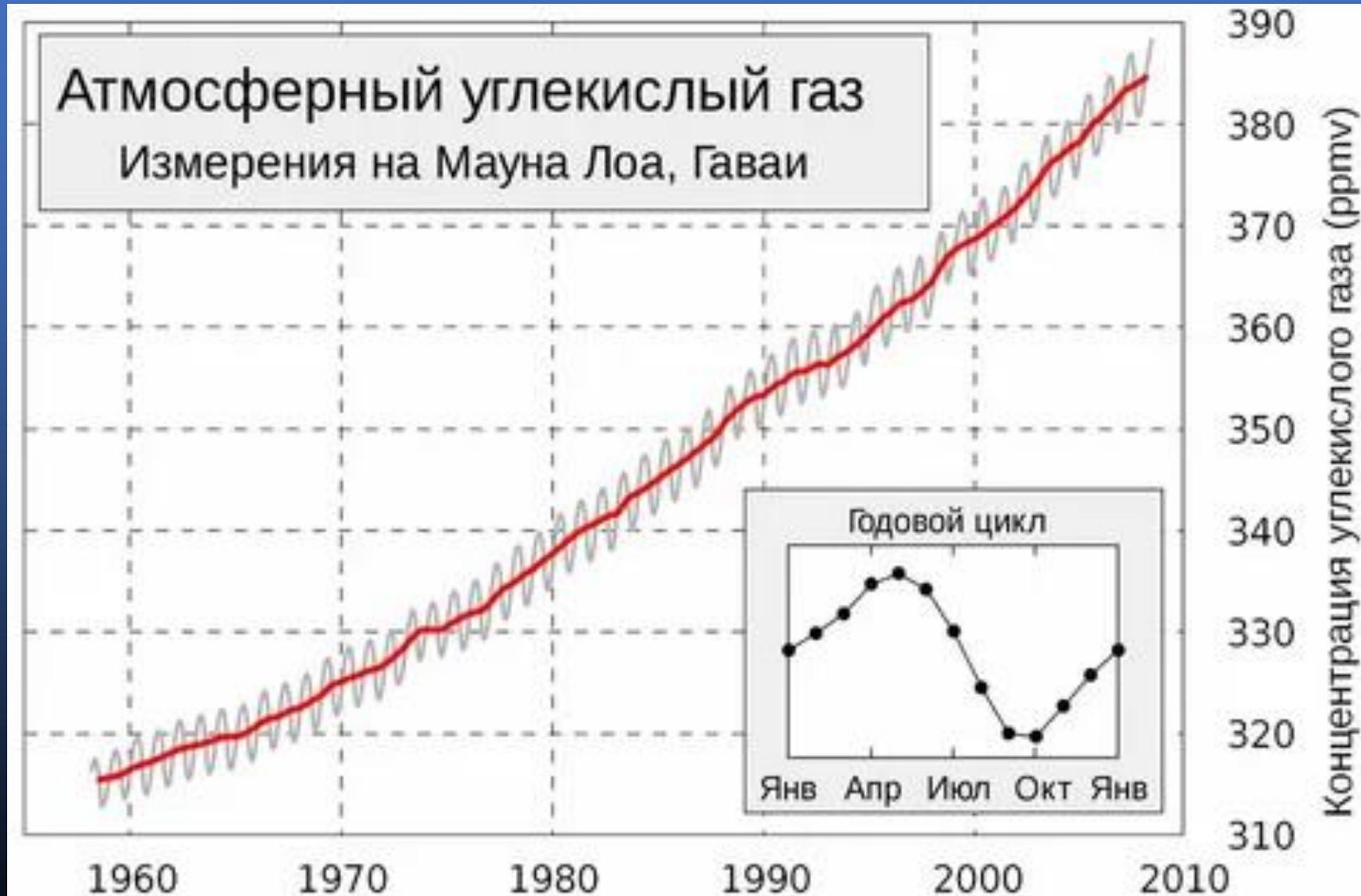
Заключение по кислороду

- Наблюдаемые изменения климата не могут привести к существенным изменениям в содержании кислорода в поверхностных водах, но могут существенно снизить поток кислорода в более глубокие слои вод. Как результат, распределение кислорода и окислительно-восстановительные условия во всех морских системах будут сдвигаться ближе к черноморскому типу с дефицитом кислорода в промежуточных слоях вод и наличием сероводорода в более глубоких слоях вод.

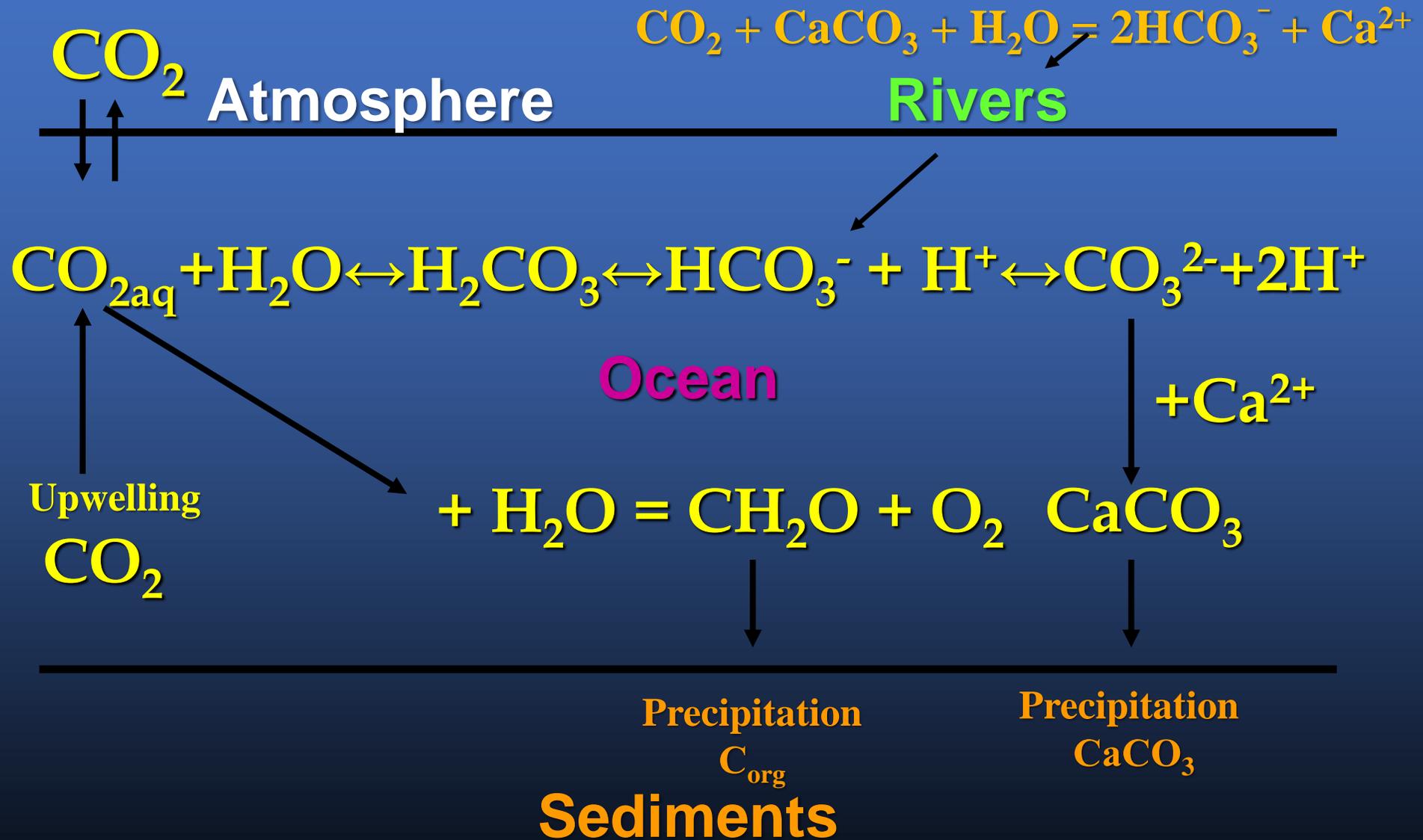
Потоки углекислого газа (CO₂)



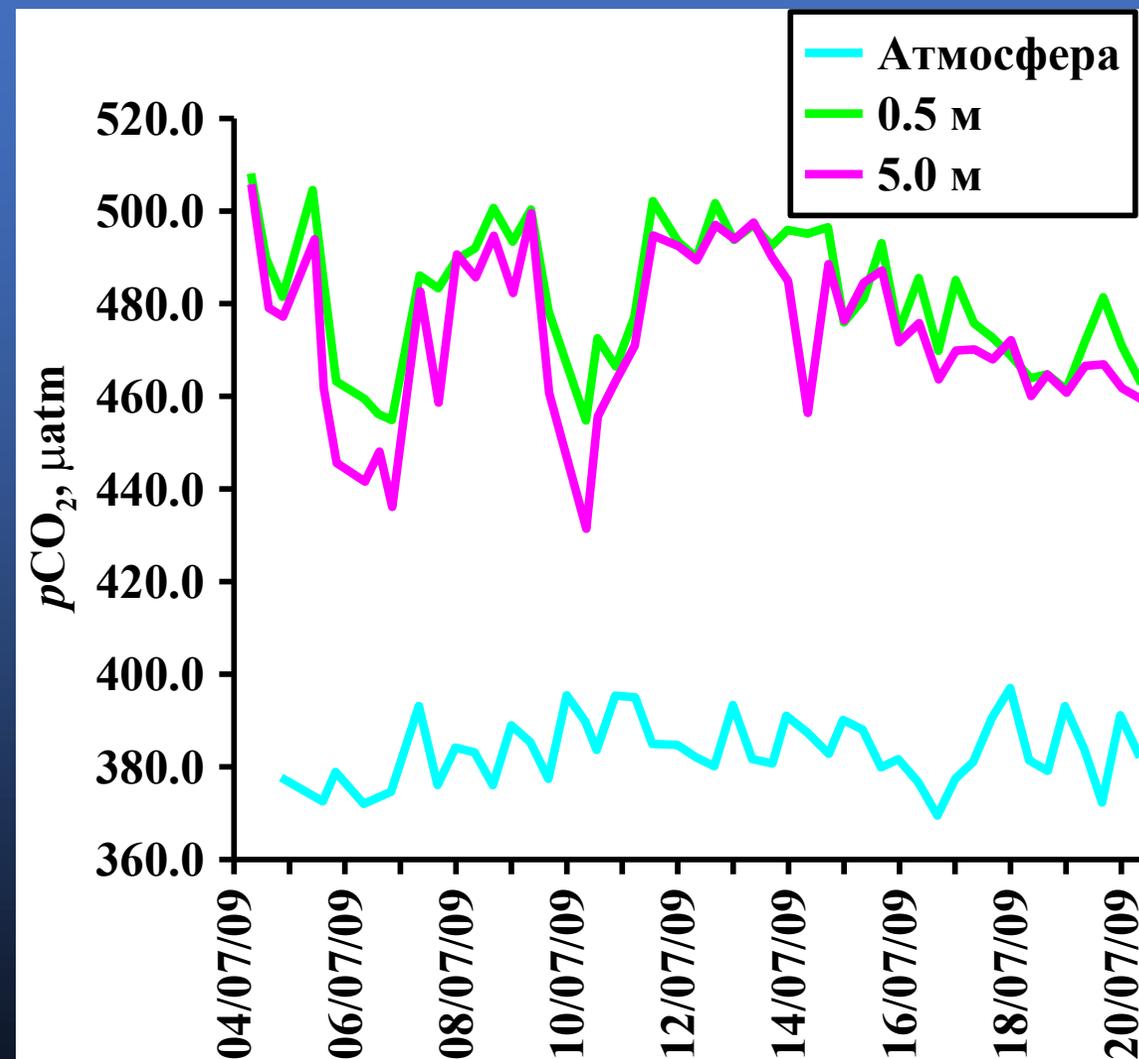
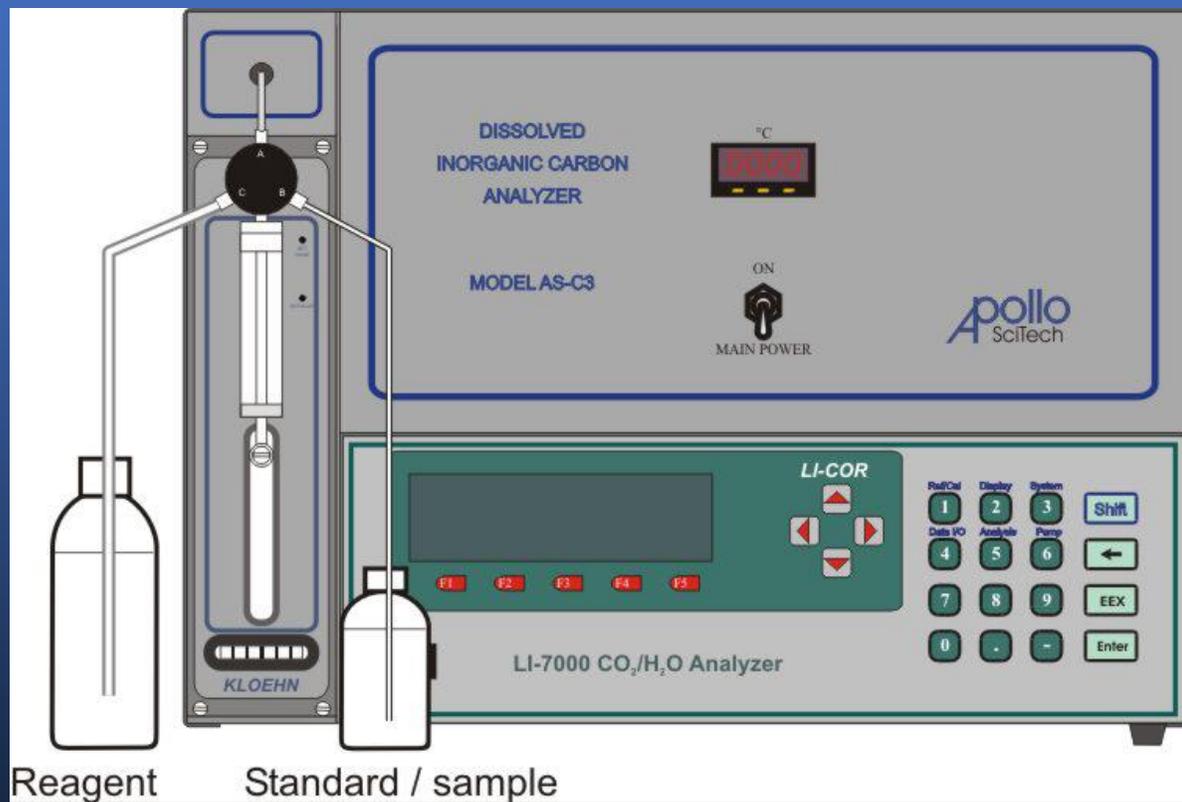
Содержание CO₂ в атмосфере



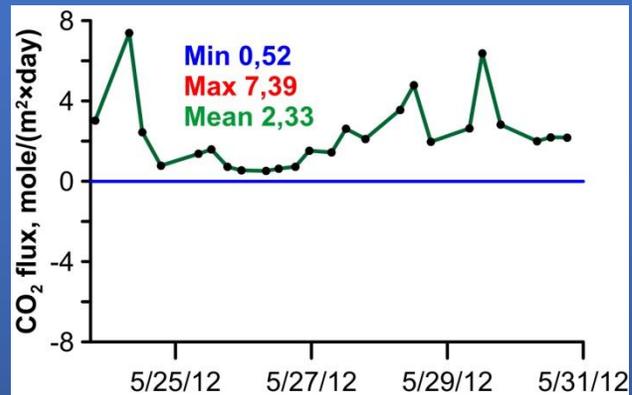
The Carbonate System



AS-CS / LI-7000DP based CO₂ studies



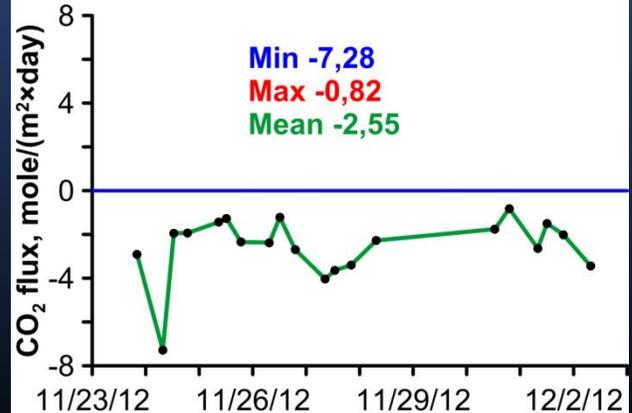
Поток CO₂ на поверхности моря



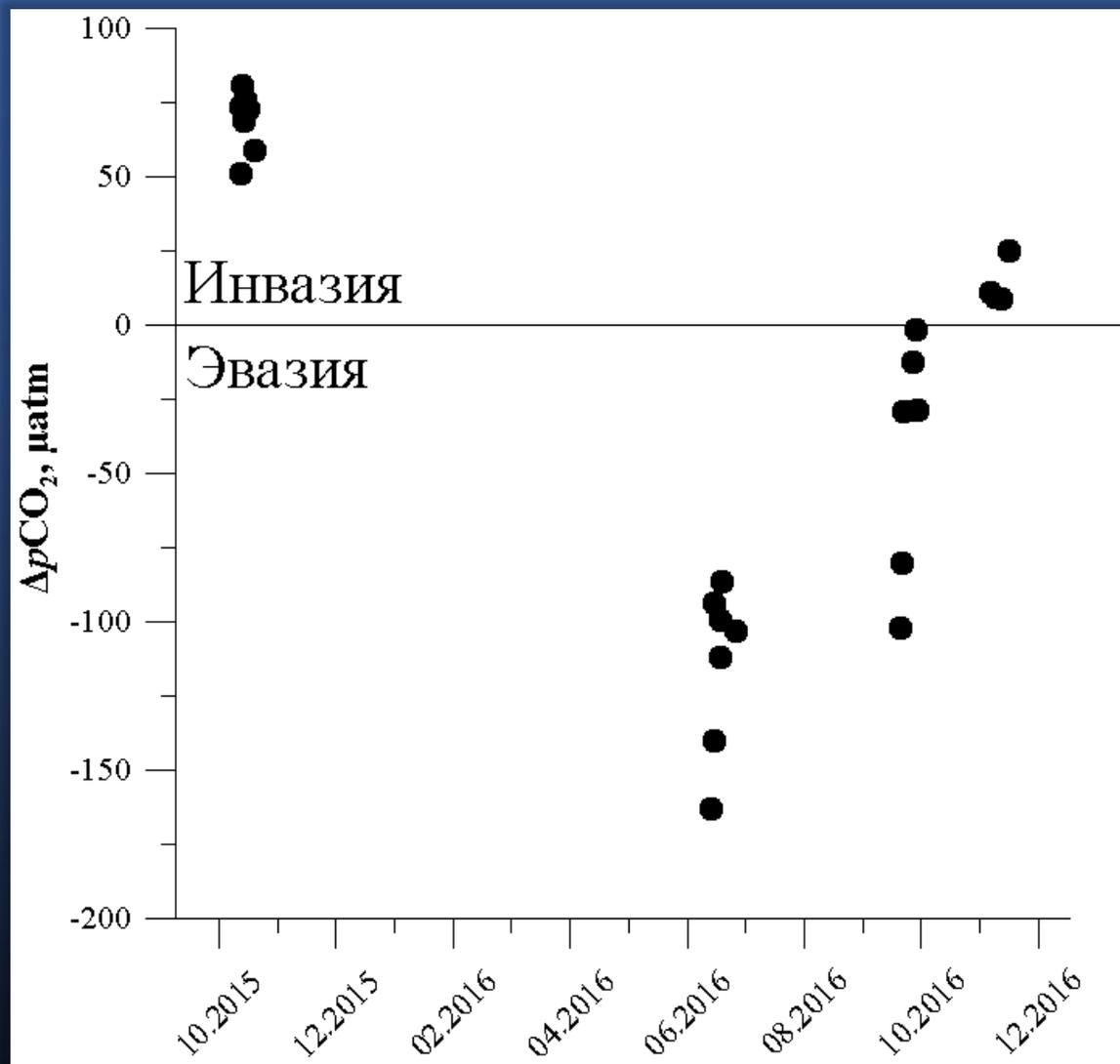
Май 2012 года



Октябрь 2012 года

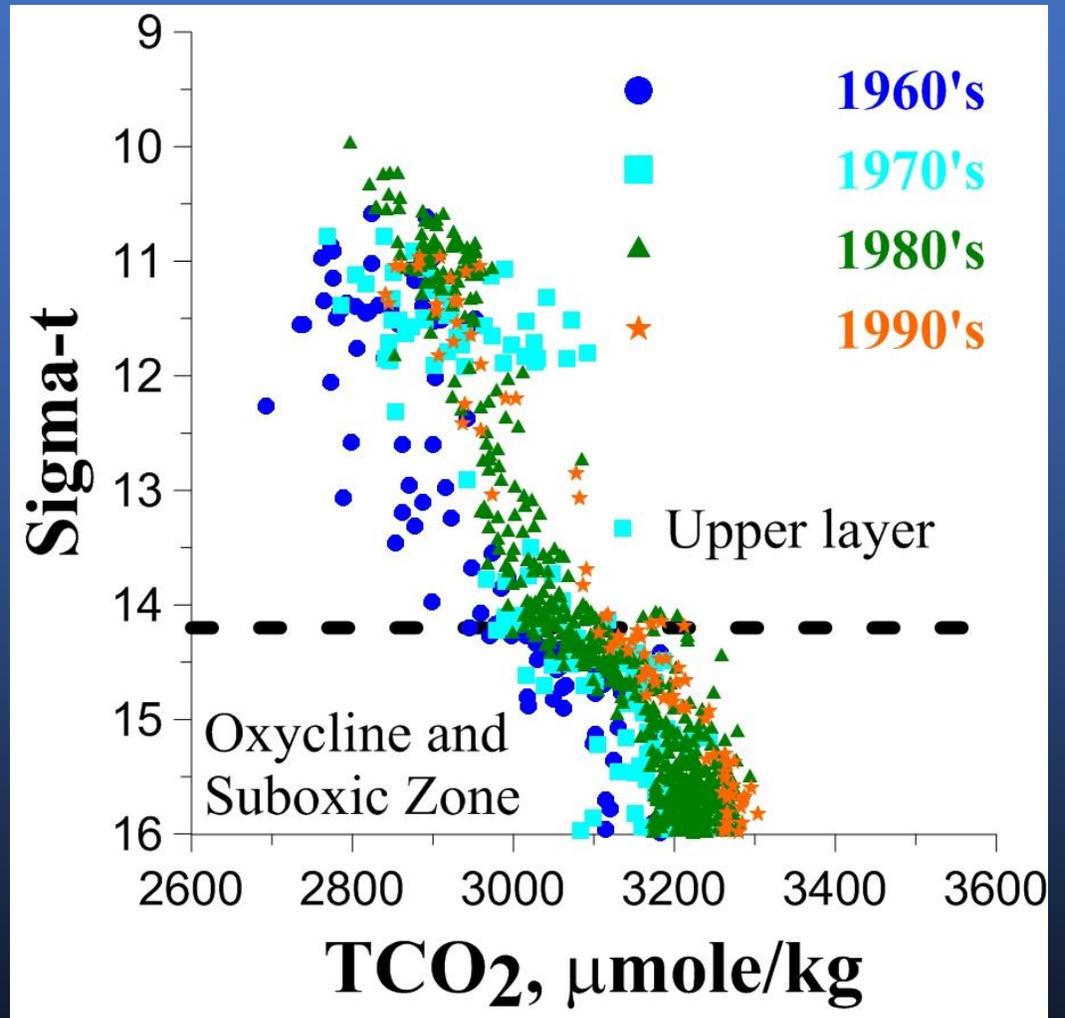
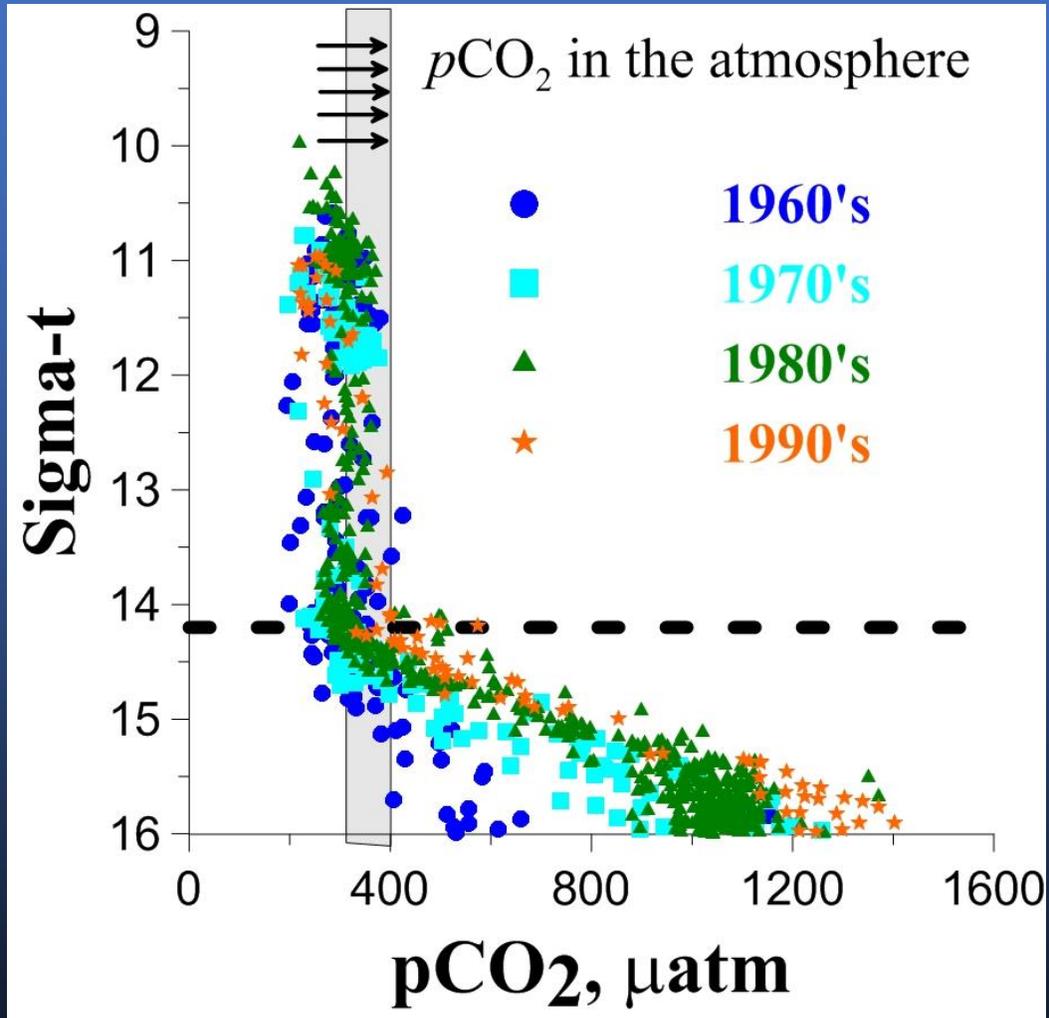


Ноябрь 2012 года

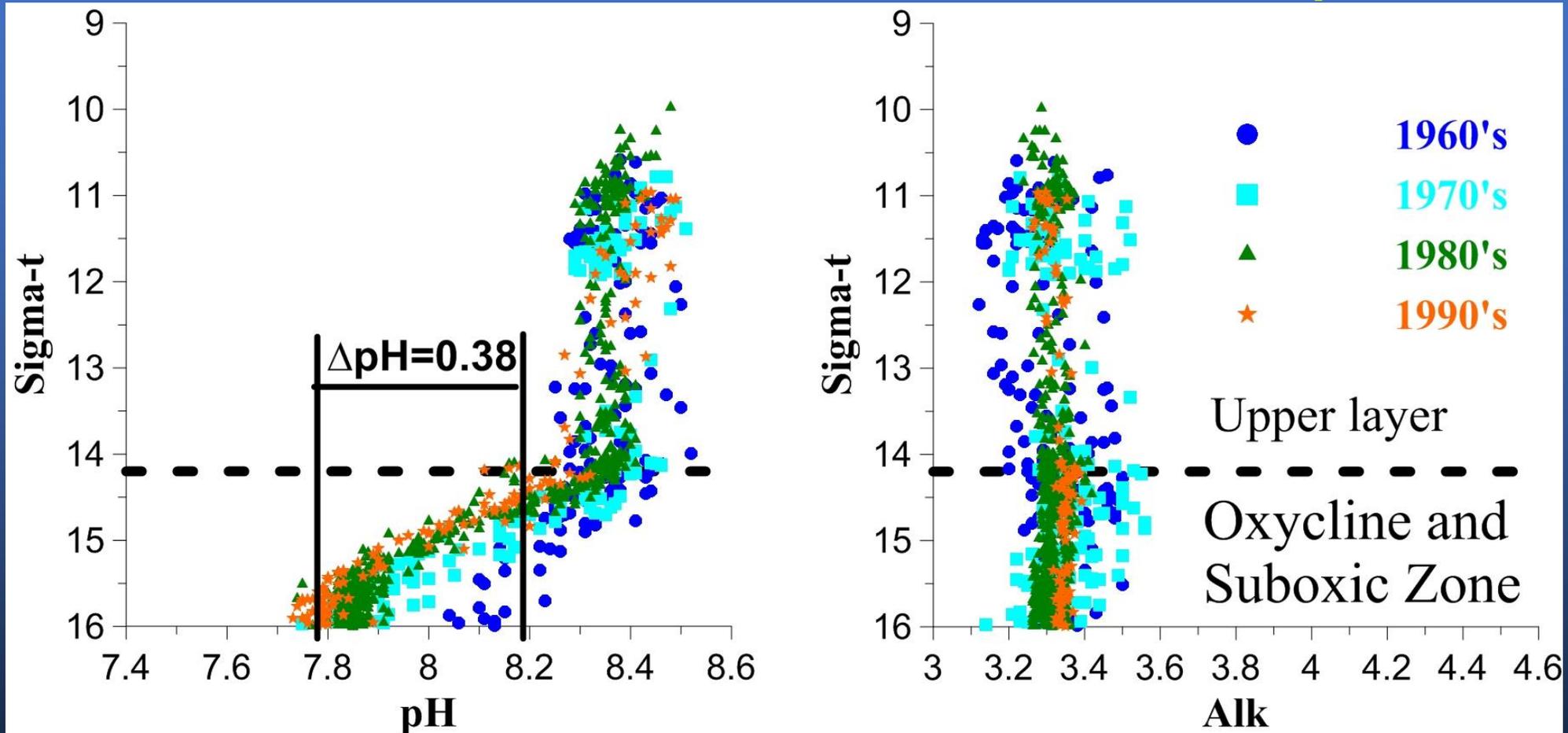


Условия поглощения CO_2 водой характерны для зимнего периода. В летний период наблюдается максимальное выделение углекислого газа в атмосферу. В осенний период происходит смена эвазии на инвазию.

Variations in the $p\text{CO}_2$ and TCO_2



Многолетние изменения Alk и pH



Концентрация H^+ увеличилась в 3 раза.

Величина *Alk* увеличилась незначительно.

Выводы по CO₂

- Динамика содержания CO₂ в поверхностных водах и направление потока CO₂ на границе вода-атмосфера определяется, в основном, температурой воды, которая определяет растворимость CO₂ в воде и константы диссоциации угольной кислоты.
- Первично-продукционные процессы слабо влияют на динамику CO₂ в верхнем деятельном слое вод, но прежде всего определяют перенос углерода в более глубокие слои вод, значительное подкисление глубинных слоев вод.
- Потепление будет приводить к снижению поглотительной способности океана в отношении CO₂ и дальнейшему подкислению и дефициту O₂ в глубоких слоях вод.

Спасибо за внимание