

Мониторинг потоков климатически активных газов в Черном море



Орехова Н.А., к.геогр.н., зав. лабораторией мониторинга парниковых газов и кислорода в морской среде,

natalia.orekhova@mhi-ras.ru

Коновалов С.К., д.геогр.н., директор
ФГБУН ФИЦ МГИ РАН

Конференция: «Национальная система мониторинга климатически активных веществ:
проблемы и решения»,

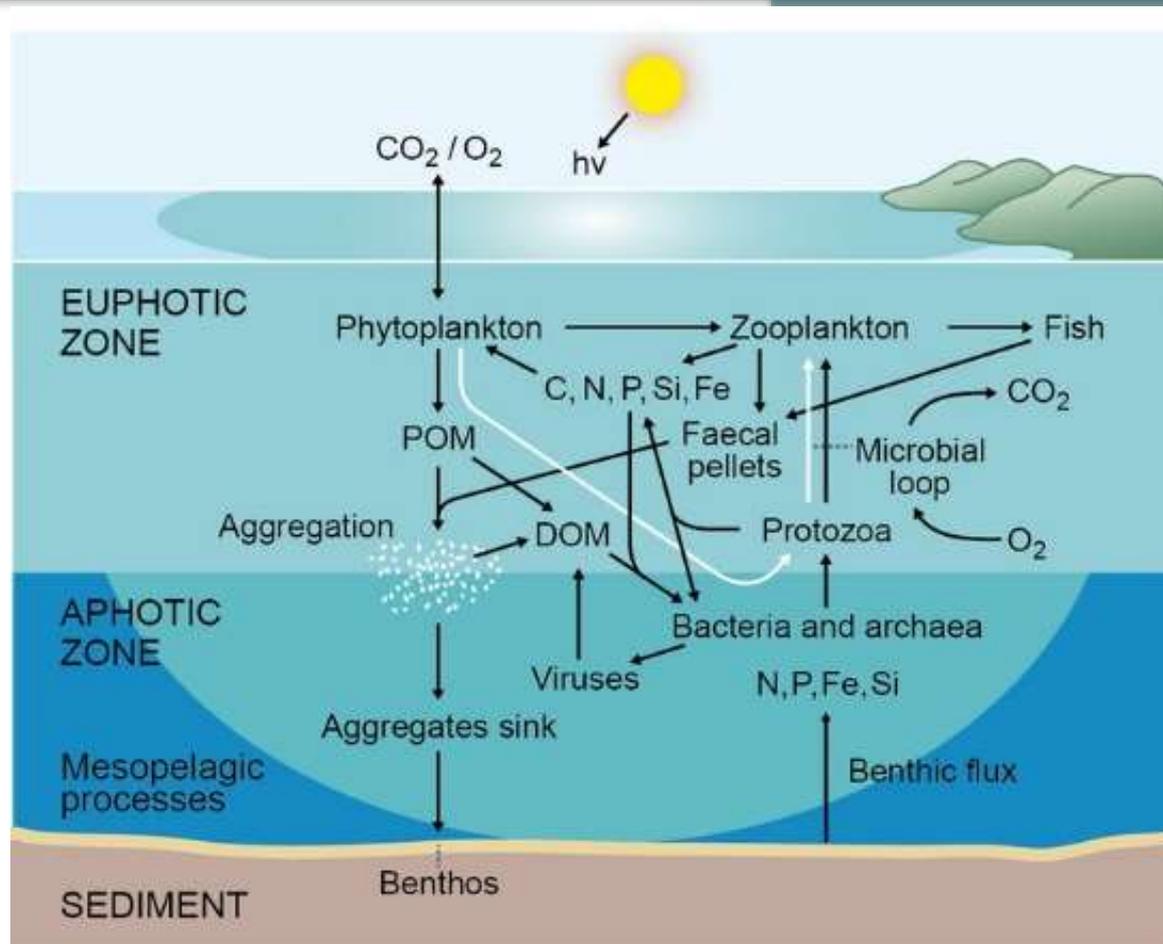
1 – 2 ноября 2023 г., Москва, ИНИОН РАН

Цель проекта

Мониторинг потока CO_2 на поверхности Черного моря и анализ факторов, определяющих его величину и динамику

Задачи:

✓ Мониторинг $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое вод и приповерхностном слое атмосферы по данным прямых измерений

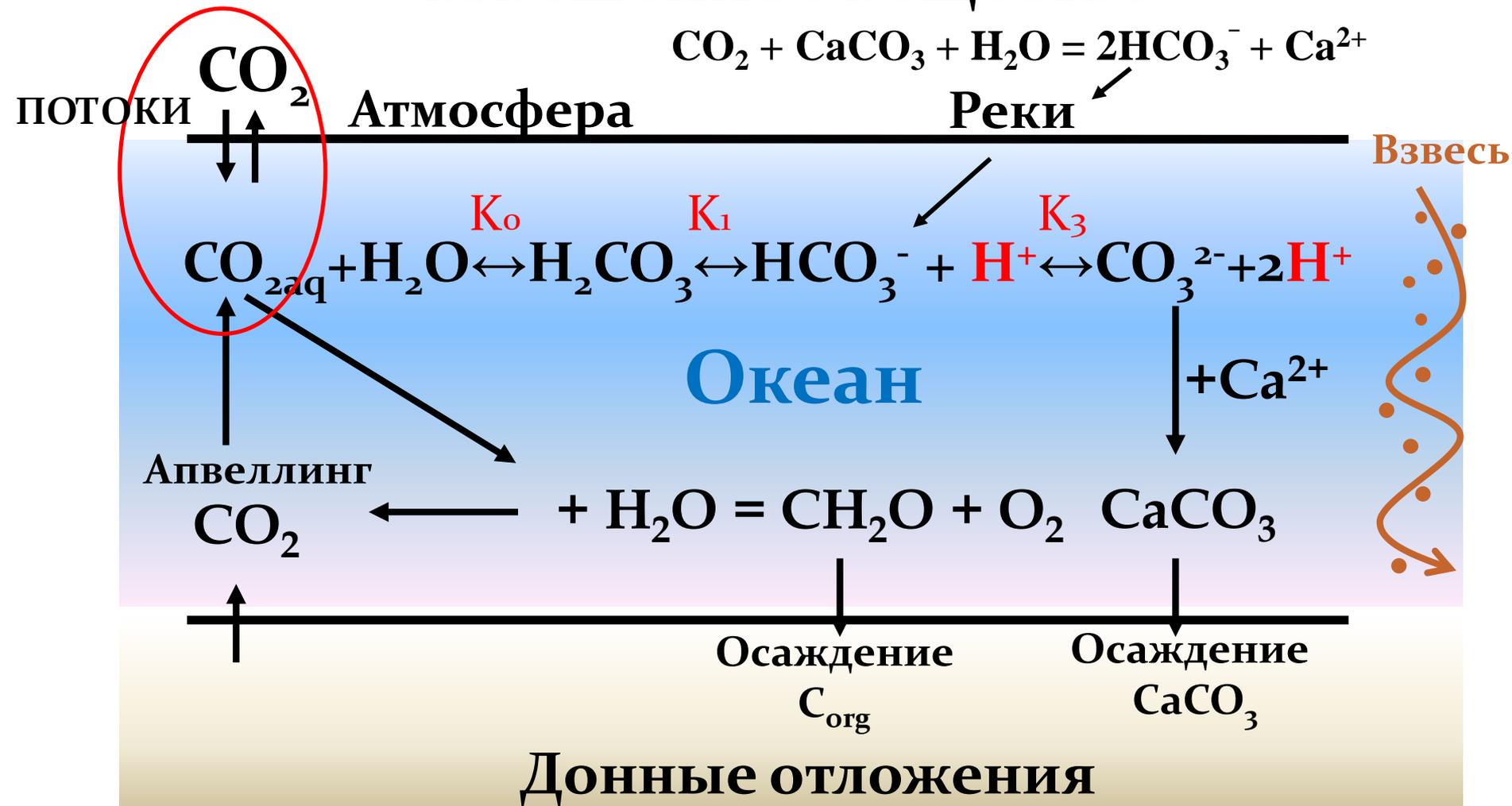


Недостаточно только измерять поток CO_2 на поверхности моря. Нужно исследовать весь цикл углерода и процессы, которые его определяют.

Структура проекта и участники

- ✓ Лаборатория мониторинга и исследования парниковых газов и кислорода в морской среде – тема гос. задания ФГБУН ФИЦ МГИ FNNN-2022-0002 «Мониторинг карбонатной системы, содержания и потоков CO₂ в морской среде Черного и Азовского морей» (Шифр: «Карбоновый полигон») – рук. Орехова Н.А.
- ✓ Соглашение ВИП ГЗ № 69-223/ВИПГЗ-23 на выполнение НИР в рамках Соглашения № 169-15-2023-002 от 01.03.2023 года «Оценка зависимости потоков CO₂ на поверхности Черного моря от физико-химических характеристик морской среды и получение характеристик сезонных изменений потоков» - рук. Орехова Н.А.
- ✓ Тема гос. задания ФГБУН ФИЦ МГИ № FNNN-2023-0001 «Обеспечение климатического и биогеохимического мониторинга потоков углерода в Черном море с использованием многолетних данных наблюдений и результатов численного моделирования» (Шифр «Углерод») - рук. Коновалов С.К. (по программе ФНТП)

Цикл углерода, карбонатная система и взвешенное вещество



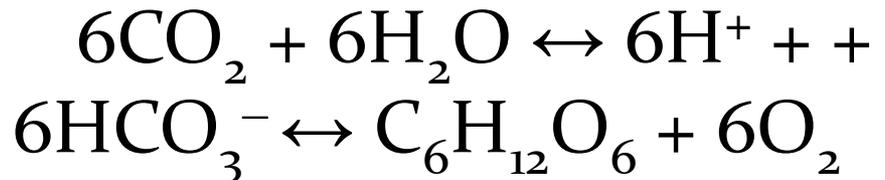
Факторы, определяющие поток CO₂

Температура,
соленость,
Ветер !!!!

Градиент pCO₂ между
поверхностным слоем вод и
приводным слоем атмосферы

$$F_{\text{CO}_2} \sim W^2 \cdot \Delta p\text{CO}_2$$

Динамика CO₂



Прямое определение объёмной концентрации и $p\text{CO}_2$

Инфракрасный анализатор LI-7000 и эквипратор для определения объёмной концентрации CO_2 в воде, обеспечивающий контакт анализируемой воды и воздуха для достижения равновесного $p\text{CO}_2$ в газовой фазе

- ✓ $[\text{CO}_2]_{=0} - 3000$ мкмоль/моль,
- ✓ погрешность - 1 % от измеряемого значения,
- ✓ Калибровка прибора - по Ag ($\text{CO}_2 = 0$) и аттестованной поверочной смеси с объёмной долей $\text{CO}_2 = 440$ мкмоль/моль.
- ✓ Пересчёт концентрации CO_2 (мкмоль/моль) в $p\text{CO}_2$ (мкатм):

$$p\text{CO}_2 = x(\text{CO}_2) \cdot P_{\text{ATM}},$$

- ✓ Поправка для осушенного воздуха:

$$p\text{CO}_2 = p\text{CO}_2 \text{ in dry air} \cdot (1 - VP(\text{H}_2\text{O})),$$

$VP(\text{H}_2\text{O})$ — давление водяного пара над пробой морской воды заданной солёности при температуре достижения равновесия.

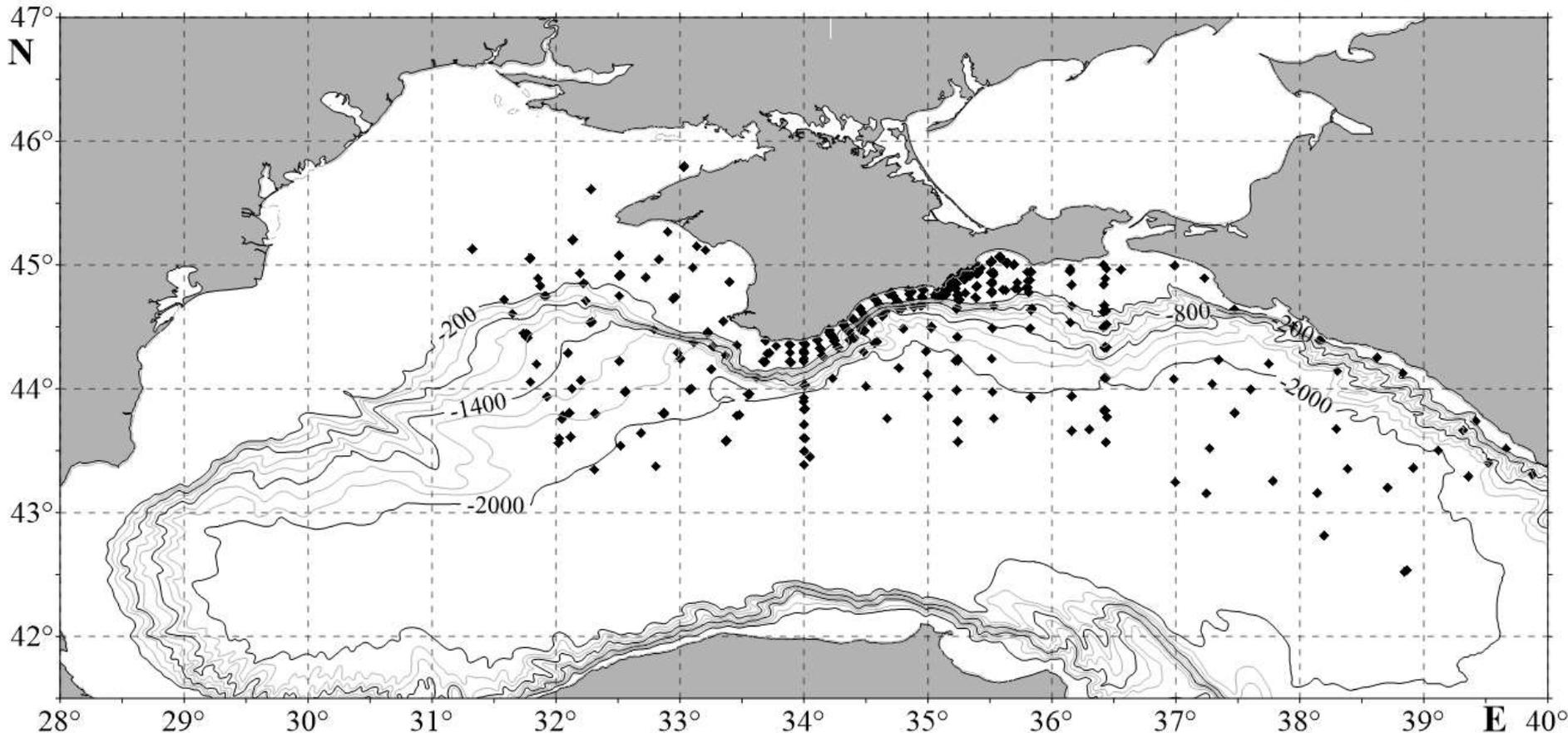
- ✓ Поправка на разницу температуры воды и температуры измерения:

$$p(\text{CO}_2, T_S) = p(\text{CO}_2, T_E) \cdot \exp(0,0423 \cdot (T_S - T_E)),$$

T_S - температура морской воды, T_E - температура в эквипраторе

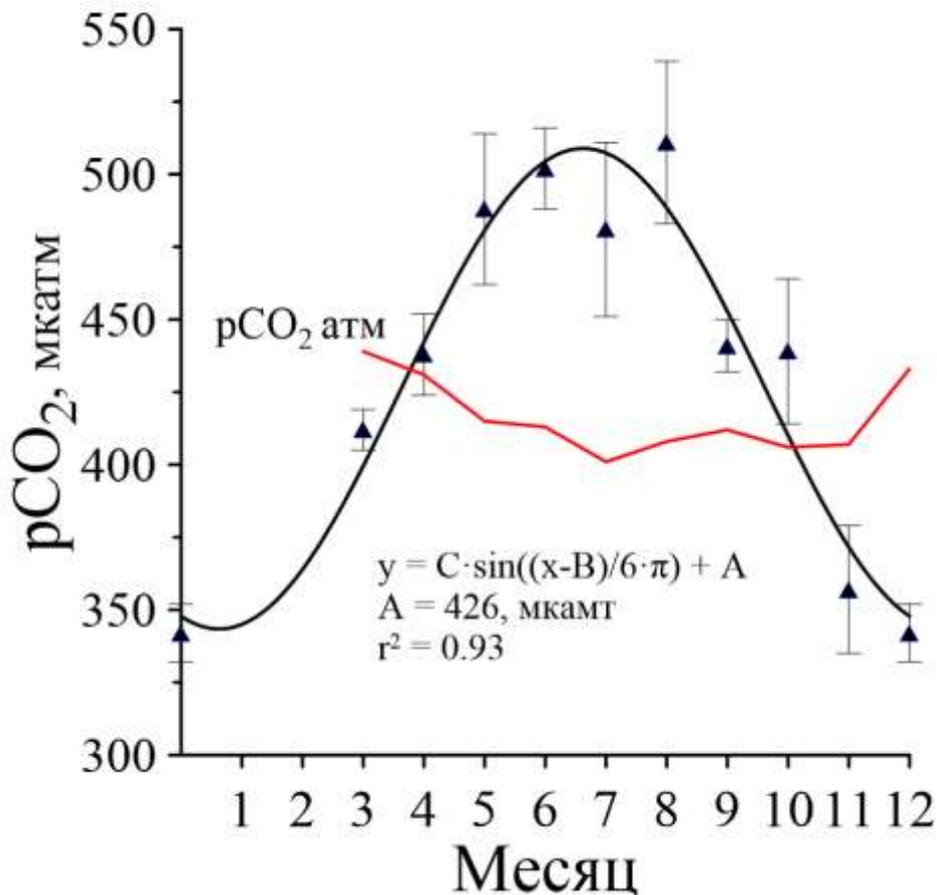


Район исследования и схема станций отбора проб



по данным экспедиционных исследований за период 2015–2023 гг. на НИС «Профессор Водяницкий» (450 измерений) с марта по декабрь

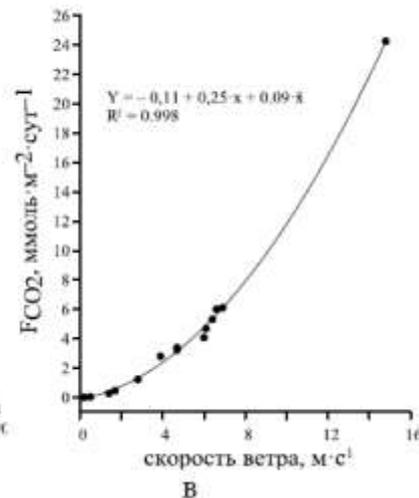
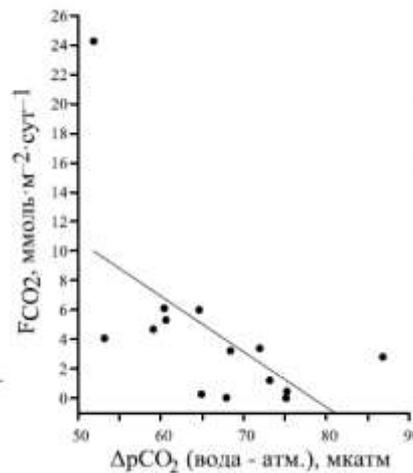
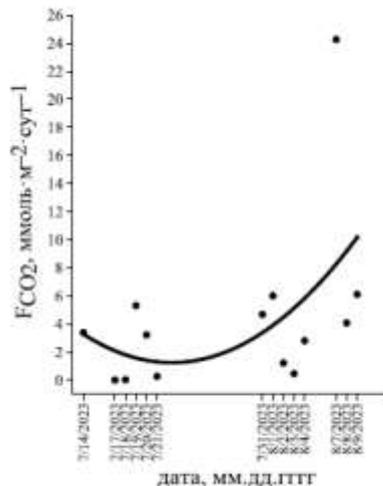
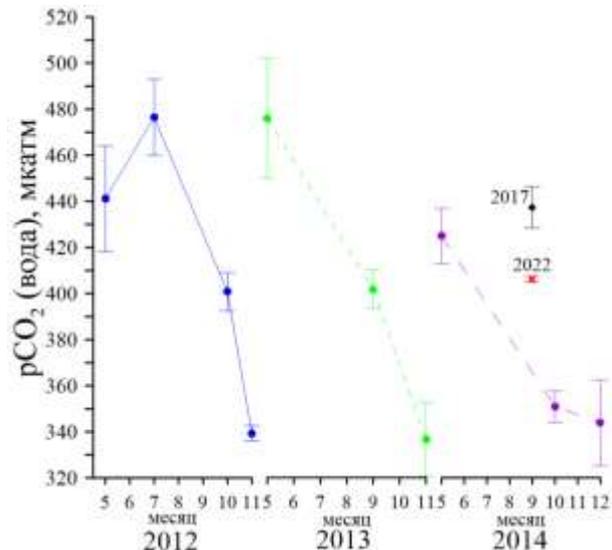
Внутригодовой ход $p\text{CO}_2$ в поверхностном слое ВОД



- ✓ $p\text{CO}_2$ атм. ~ 418 мкАТМ,
- ✓ В теплый период (май - октябрь) – воды Черного моря источник CO_2 для атмосферы,
- ✓ В холодный период (ноябрь - апрель) воды Черного моря – сток атмосферного CO_2 ,
- ✓ Для более точных оценок нужны систематические исследования

Мониторинг $p\text{CO}_2$ потоков CO_2 на стационарном пункте наблюдений на ЧГПП (пгт. Кацивели)

В 2023 г. измерения $p\text{CO}_2$: май, июль, август; план – октябрь, декабрь



Величина потока CO_2 на границе с атмосферой (а), зависимость величины потока CO_2 от градиента $p\text{CO}_2$ (б) и скорости ветра (в) по данным, полученным на стационарном пункте наблюдений в пгт.

Кацивели в период 17.07.2023 – 08.08.2023



Притопленные буйковые станции

Глубина 1970 м

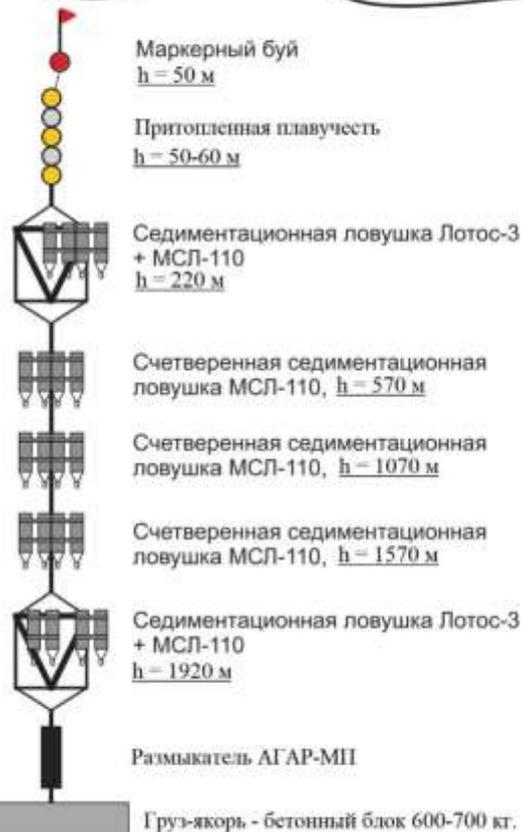
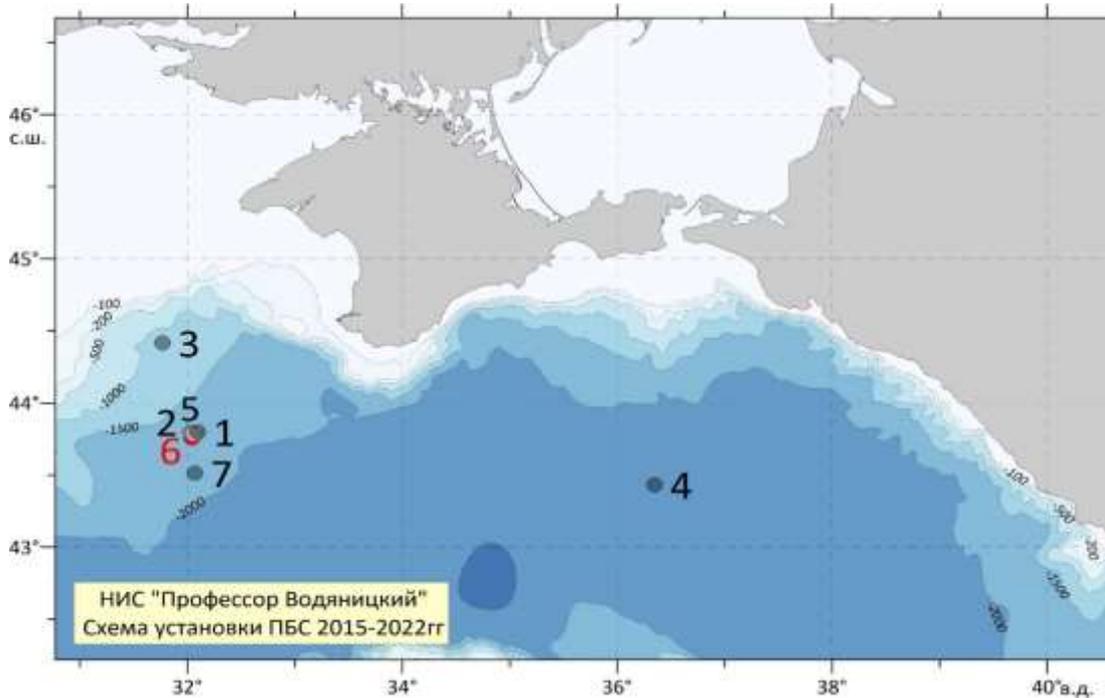


Таблица – Основные технические характеристики седиментационных ловушек

	МСЛ-110	Лотос-3
Производитель	МГИ	ОКБ ОТ РАН
Площадь сбора, м ²	2 x 0,0095	0,5
Количество пробосборников	2	12
Смена пробосборников	нет	Есть
Рабочая глубина	без ограничений	до 6000 м
Продолжительность работы	без ограничений	до 12 месяцев
Емкость пробосборника, мл	500	260/300
Интервалы экспозиции	без ограничений	1–39 суток
Время задержки первого пробосборника	–	1–29 часов
Напряжение питания блока управления	–	12 В
Элементы питания	–	LSH14 “Soft”, 4 шт.

Схема установки ПБС в Черном море в 2015-2022 гг.



№	Срок установки	Рейс установка/подъем	Координаты	Глубина	Статус
1	05.11.2015-21.11.2016	ПВ81/ПВ91	43° 47.958' с.ш. 32° 5.733' в.д.	1820м	Поднята
2	22.11.2016-15.12.2017	ПВ91/101	43° 47.012' с.ш. 32° 3.357' в.д.	1800м	Поднята
3	24.11.2016-23.12.2017	ПВ91/101	44° 24.955' с.ш. 31° 46.111' в.д.	1150м	Поднята
4	18.12.2017-04.12.2018	ПВ101/ПВ105	43° 25.985' с.ш. 36° 20.942' в.д.	2160м	Поднята
5	24.11.2018-05.10.2019	ПВ105/ПВ110	43° 47.633' с.ш. 32° 1.687' в.д.	1750м	Поднята
6	06.10.2019-17.09.2020	ПВ110/ПВ114	43° 45.5' с.ш. 32° 2.5' в.д.	1820м	Не поднята
7	24.09.2021-04.10.2022	ПВ119/ПВ124	43° 30.834' с.ш. 32° 4.176' в.д.	1970м	Поднята

Вещественный состав взвешенного вещества

✓ Взвешенные формы углерода представлены **ЛИТОГЕННЫМ** (терригенное, абиогенное) и **БИОГЕННЫМ** (остатки живых и отмерших организмов) веществом.

✓ Биогенная часть складывается из органического вещества (C_{org}), аморфного кремнезема и взвешенного карбоната кальция ($CaCO_3$).

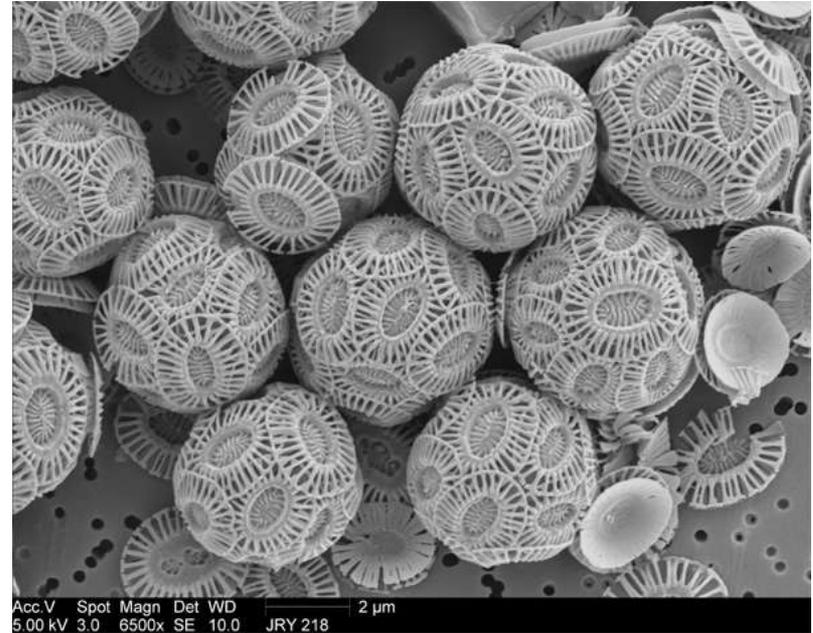
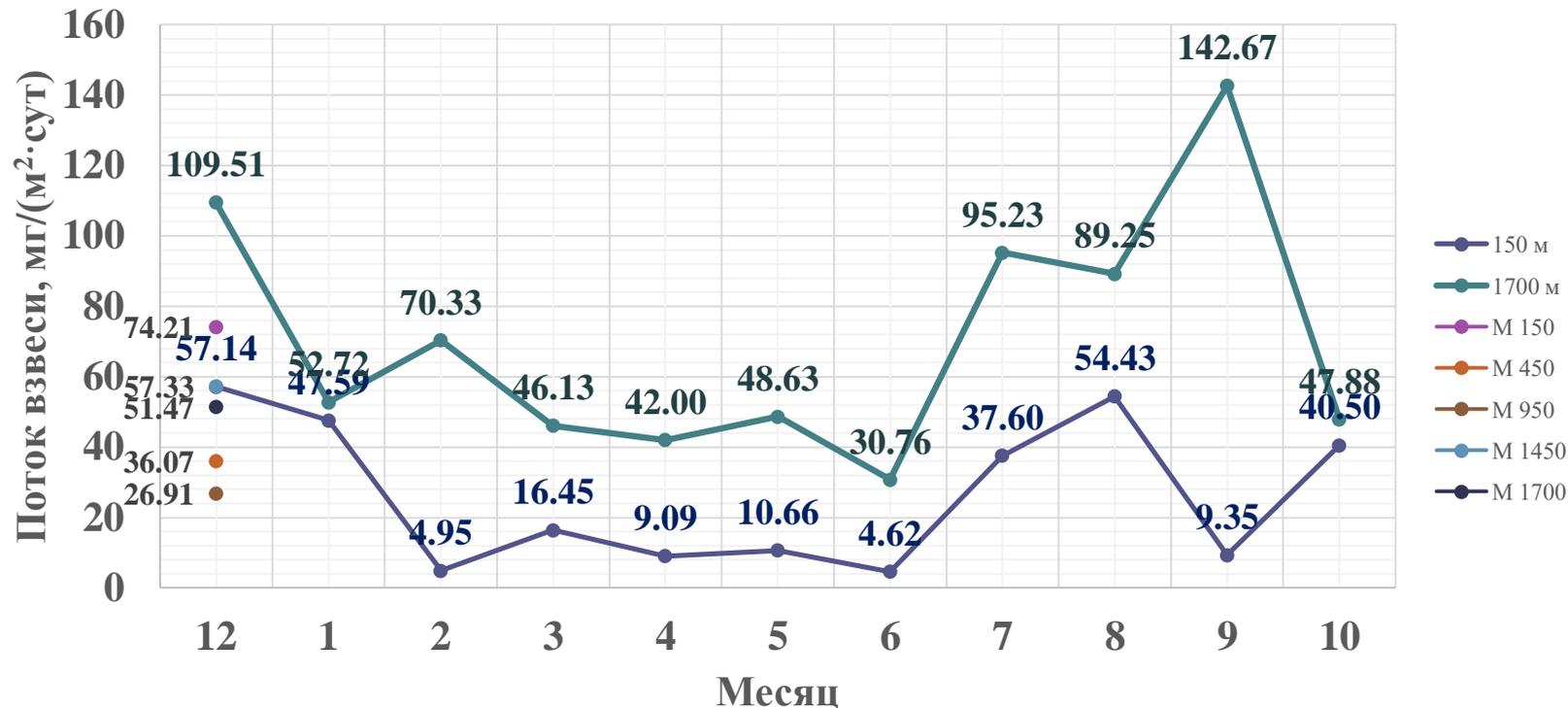


Фото с сайта www.co2.ulg.ac.be

Результаты исследований

Потоки взвеси



Поскольку наблюдения выполняются в ограниченном количестве точек, необходимо использовать численные модели для получения трехмерных характеристик и их изменений на внутри- и межгодовых масштабах

Моделирование долговременной эволюции экосистемы Чёрного моря

Биогеохимическая часть модели

Представляет собой систему уравнений переноса-диффузии для компонент экосистемы в верхнем 200м слое моря (26 z-уровней):

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} + \frac{\partial((w+w_s)F)}{\partial z} = K_h \nabla^2 F + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial F}{\partial z}) + \mathfrak{R}(F),$$

где $\mathfrak{R}(F)$ – члены уравнения типа источников–стоков

Модель включает 15 переменных состояния:

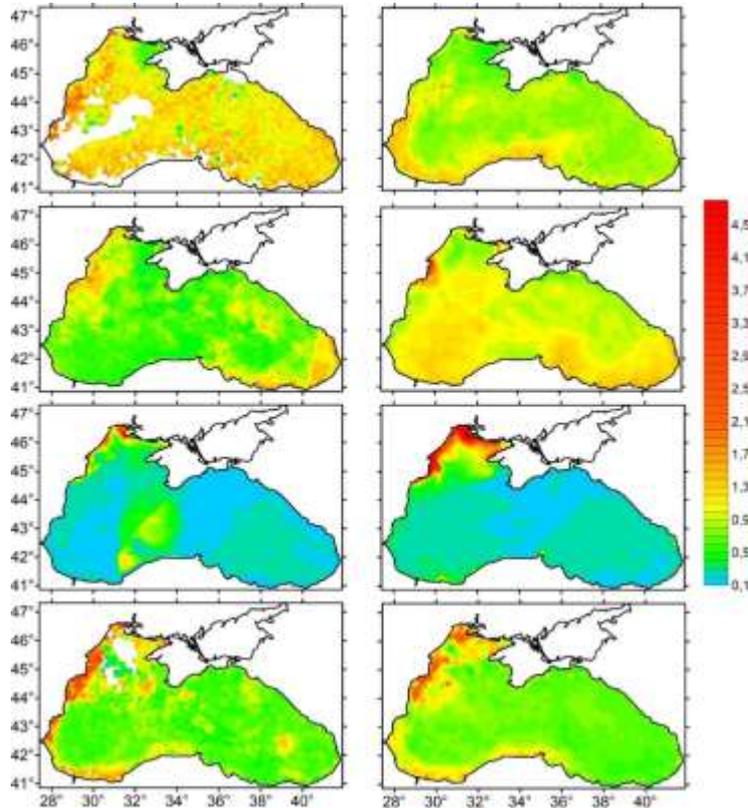
- Два типа фитопланктона (диатомовые и флагелляты)
- Два размерных типа зоопланктона (микро- и мезо-)
- Бактериопланктон
- *Aurelia aurita*
- *Mnemiopsis leidyi*
- *Noctiluca scintillans*
- Взвешенная органика
- Растворённая органика
- Нитриты, нитраты
- Аммоний
- Сероводород
- Растворённый кислород

В устьях крупных задаются потоки нитратов и аммония, связанные с речным стоком

На нижней жидкой границе задаются концентрации аммония и сероводорода

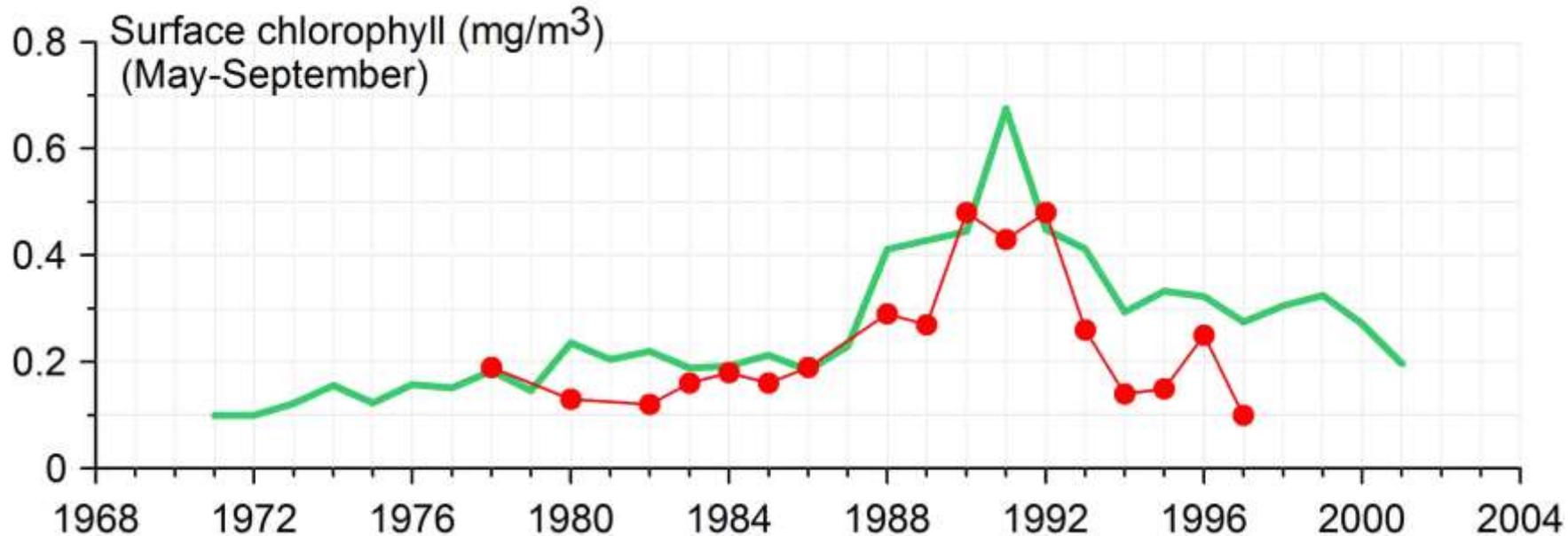
Поля скоростей, температуры, солёности и коэффициенты турбулентной диффузии являются результатом работы модели циркуляции и используются в режиме *off-line*.

Валидация результатов моделирования



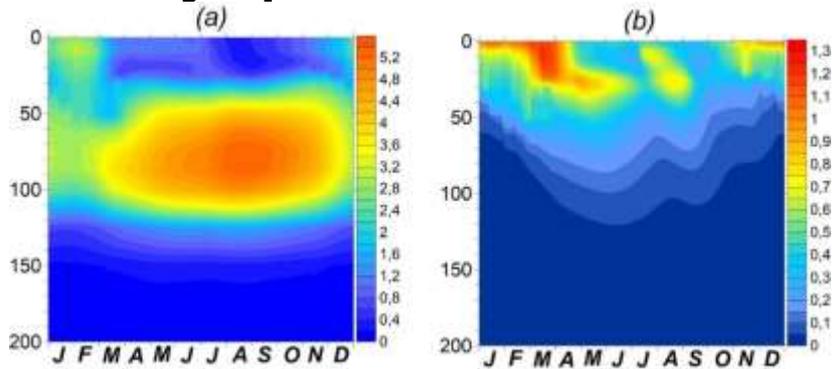
Карты распределения поверхностного хлорофилла (mg m^{-3}) для января, марта, августа и ноября 2000г. по результатам измерений (слева) и моделирования (справа).

Сравнение с наблюдениями

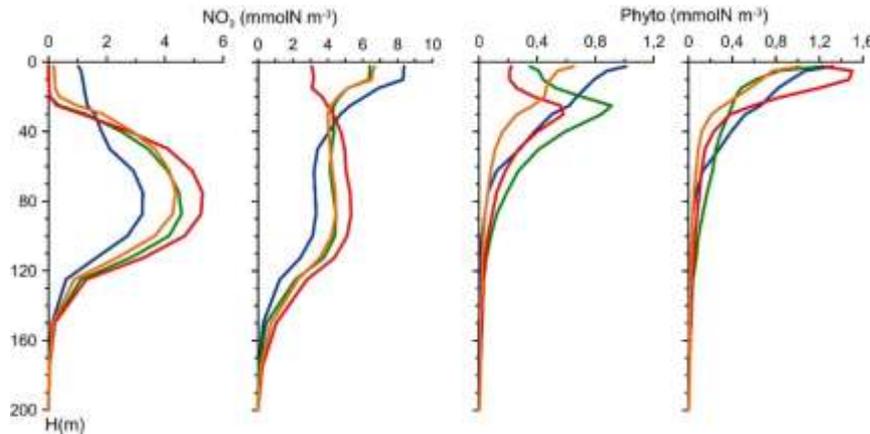


Сравнение средних за период май-сентябрь значений хлорофилла по данным in-situ измерений (красные кружки) и соответствующие им значения фитопланктона, вычисленные по результатам моделирования. Данные получены осреднением примерно 1000 измерений поверхностной концентрации хлорофилла-а, выполненных в течение периода май-сентябрь каждого года (Oguz et al., 2004) .

Внутригодовая изменчивость



Годовые циклы изменения концентрации нитратов (а) и фитопланктона (б) (mmolN m^{-3}) в верхнем 200-миллиметровом водяном столбе



Средне-сезонные профили концентрации нитратов и фитопланктона для глубоководной части бассейна и северо-западного шельфа. (Синяя линия соответствует зиме, зеленая - весне, красная - лету, оранжевая - осени)

Дополнение для расчета потоков углекислого газа

$$\frac{\partial}{\partial t} DIC = \dots + R(DIC); \quad DIC = [CO_2] + [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]$$

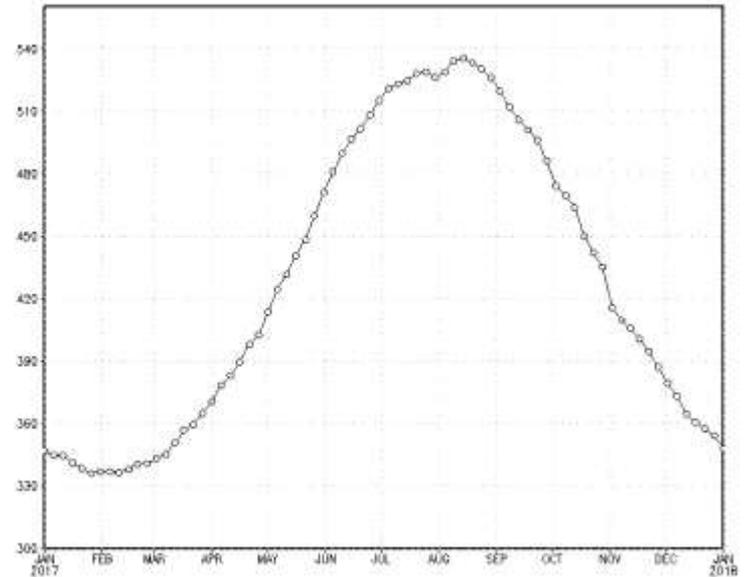
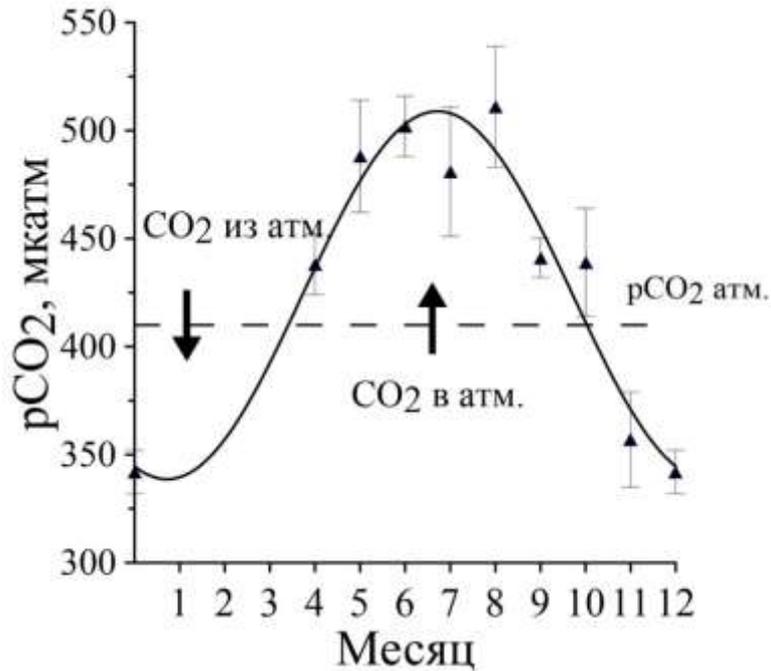
$$R(DIC) = Res - upt + Ox$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Alk = \dots + R(Alk);$$

$$[DIC] = [CO_2] \times \left\{ 1 + \frac{K_1}{[H^+]} + \frac{K_1 K_2}{[H^+][H^+]} \right\}$$

$$[CO_2] = K_0 pCO_2$$

Результаты наблюдений и численного моделирования CO₂



Общие ожидаемые результаты

1. Особенности формирования трехмерных полей взвешенного органического и неорганического углерода, поскольку седиментационная ловушка стоит в одной точке; (ФНТП)
2. Особенности формирования полей компонентов карбонатной системы, а значит и CO_2 , поскольку экспедиционные данные только на ряде станций и в некоторых рейсах; (Лаборатория)
3. Оценка потоков CO_2 на поверхности моря в зависимости от физических и биогеохимических процессов. (ВИП ГЗ)

Показатели ВИП ГЗ

- ✓ Создание стационарного пункта наблюдений на ЧГПП,
- ✓ Акт внедрения результатов НИР
- ✓ Акт внедрения методики определения $p\text{CO}_2$
- ✓ Регистрация базы данных

- ✓ Систематические прямые измерения $p\text{CO}_2$:
- ✓ 12-ти мильная зона Крымского полуострова,
- ✓ стационарный пункт на ЧГПП
- ✓ Севастопольская бухта