

Влияние физических факторов на биологические характеристики морских экосистем

Кубряков Арсений Александрович

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Морской Гидрофизический Институт РАН

Президиум Российской Академии Наук

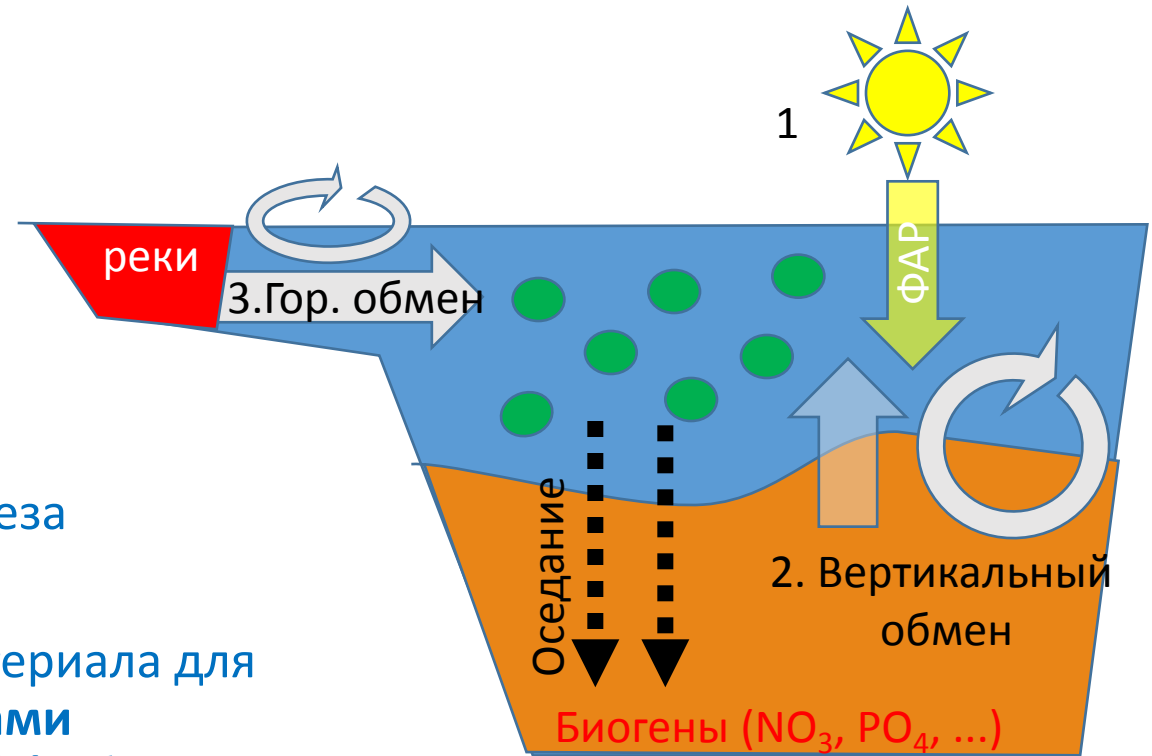
9 февраля 2022 г.

Введение

Биопродуктивность океана значительно влияет на климат и хозяйственную деятельность человека. Океан является “биологический насосом”, который поглощает почти половину атмосферного CO₂ за счет фотосинтеза.

Биопродуктивность обладает значительной изменчивостью, которая определяется развитием первого трофического звена – фитопланктона, и зависит от **физических условий среды**:

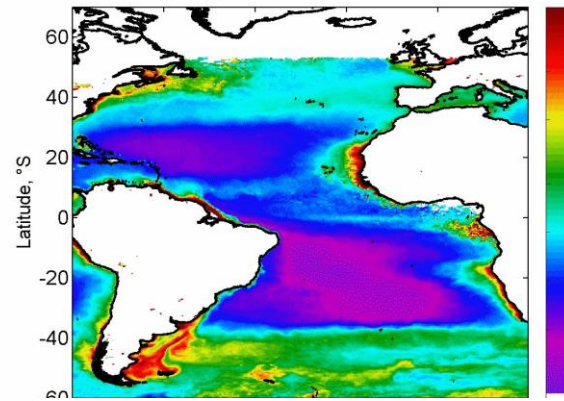
- ✓ **освещенности (1)**, необходимой для фотосинтеза
- ✓ потоков биогенных веществ (строительного материала для клеток), связанных с динамикой вод – **процессами вертикального (2) обмена и горизонтального (3) обмена**



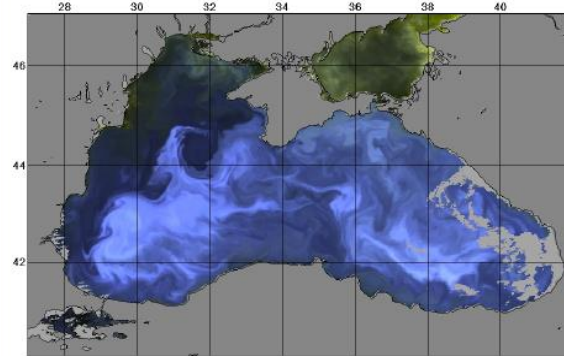
Цель доклада – продемонстрировать примеры комплексного воздействия различных физических факторов на *изменчивость* биологических характеристик морских экосистем

Спутниковые измерения. Спутниковые приборы осуществляют площадные измерения различных характеристик океана

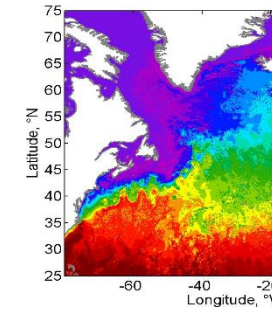
Оптические характеристики



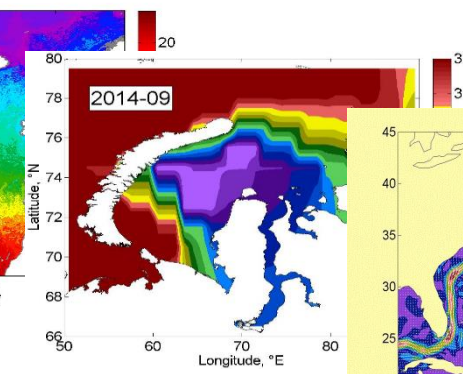
Сезонный ход Хл в Атлантике



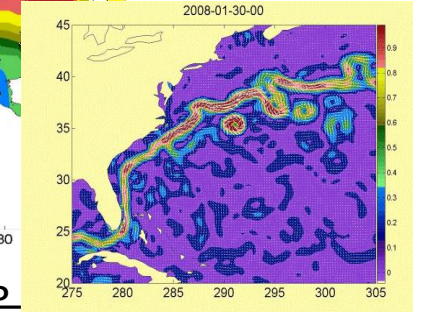
Кокколитофориды в Черном море



Температура

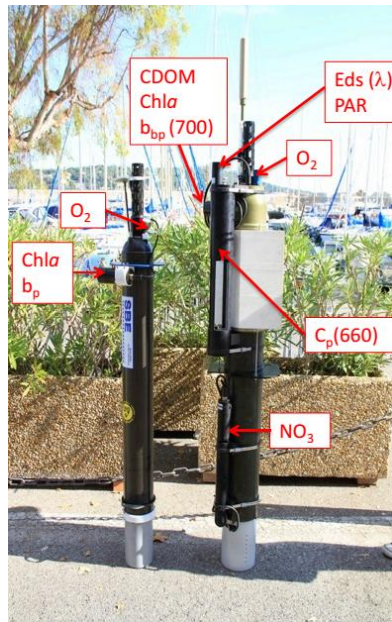


Соленость



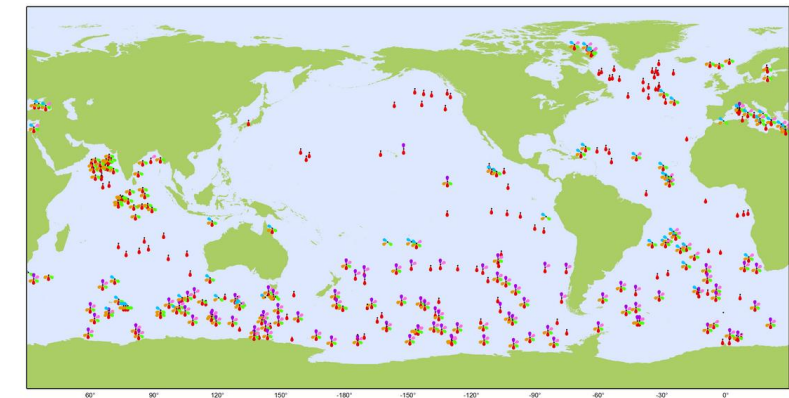
Скорость течений и др.

Буи-профилемеры Био-Арго



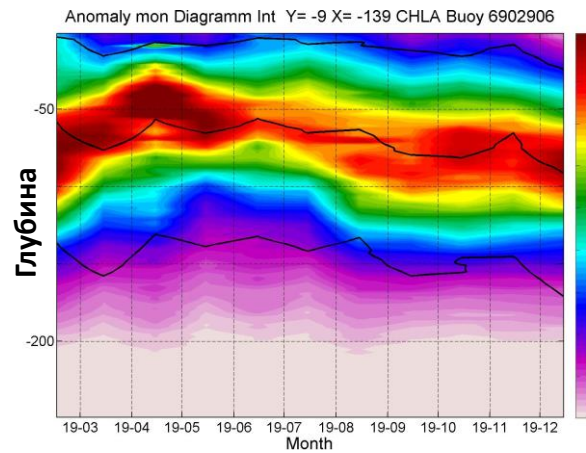
Профилирующие буи Био-Арго дают возможность осуществлять регулярные измерения вертикального распределения характеристик среды на основе оптических методов

- Концентрацию хлорофилла А (Хл)
- Коэффициент обратного рассеяния на частицах
- Концентрацию кислорода (O_2), нитратов (NO_3), кислотность (pH)
- Характеристики освещенности на разных длинах волн, в том числе фотосинтезирующая активная радиация (ФАР) на 400-700 нм) и др.

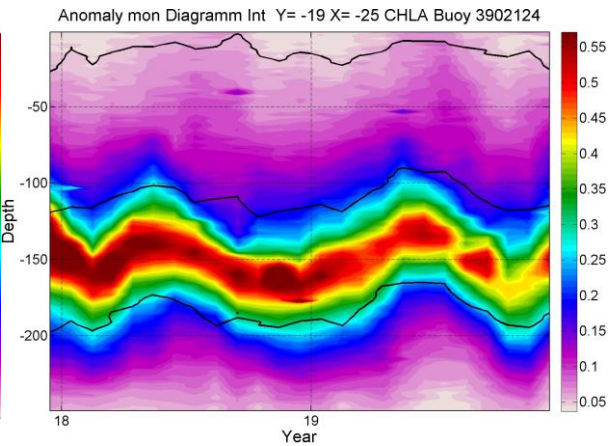


Более 485 буев запущено с 2010 г., данные – в свободном доступе

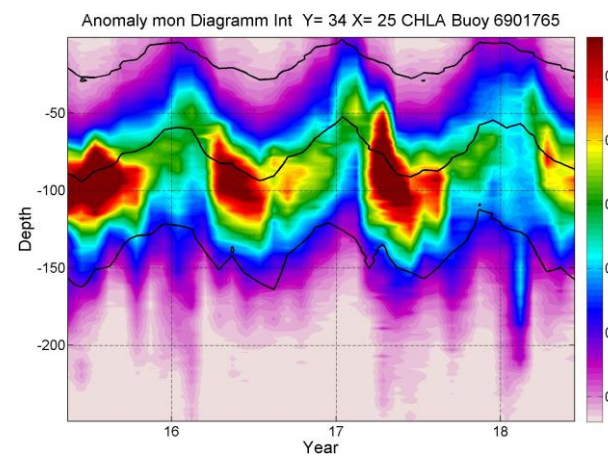
Вертикальное распределение концентрации хлорофилла по данным буев Арго



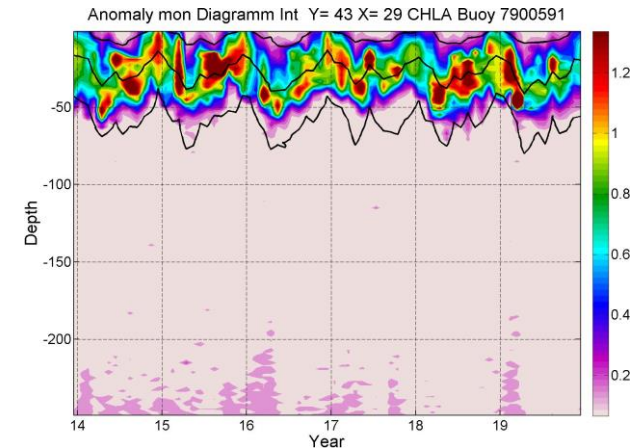
Экватор



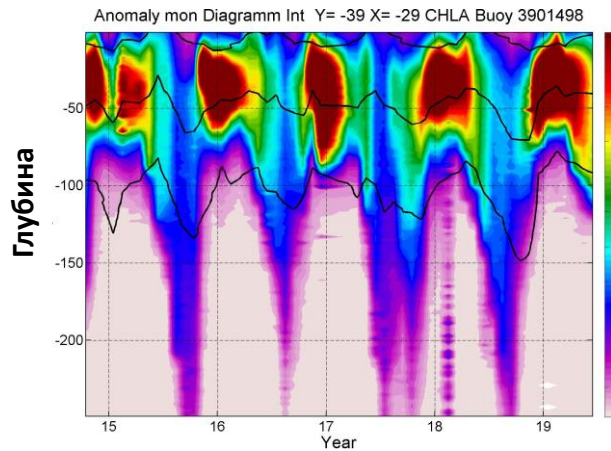
Тропическая Атлантика



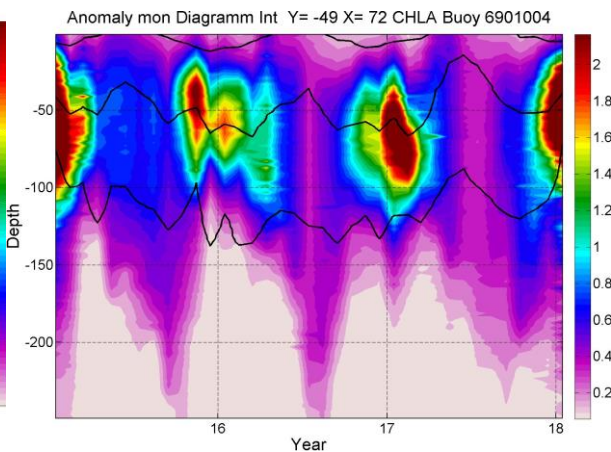
Средиземное море



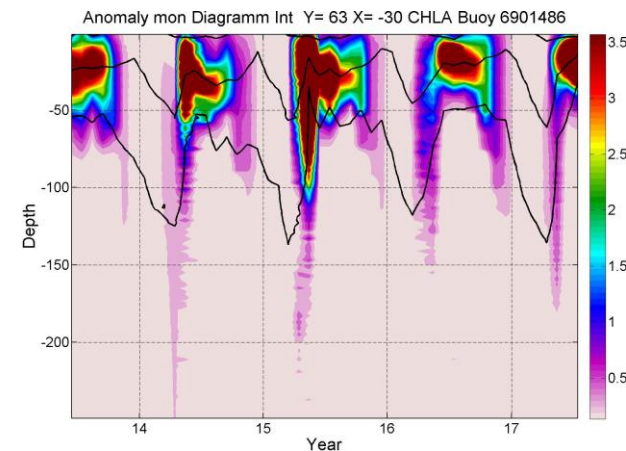
Черное море



Субтропический фронт



Южный океан



Субполярная Атлантика

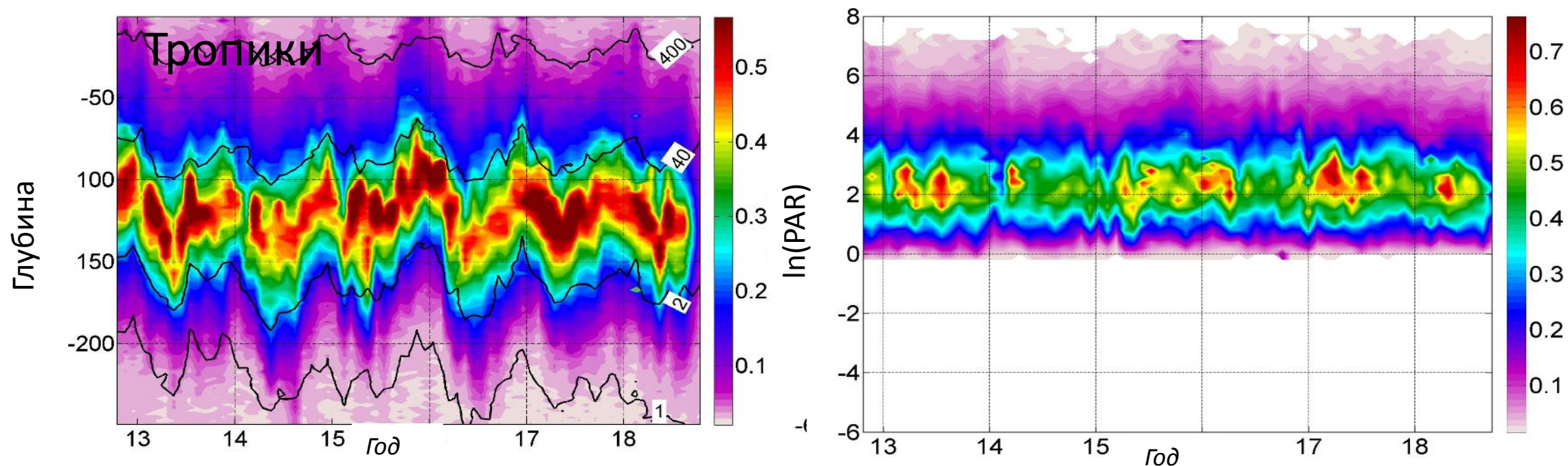
Межгодовая изменчивость Хл в различных регионах Мирового океана по данным буев Био-Арго. Черные линии и показывают положения изолем 3, 20, 330 $\mu\text{mole photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$

Во всех районах наблюдается **глубинный максимум Хл**, который имеет значительно различающееся вертикальное положение и изменчивость

Причины его формирования и изменчивости - предмет многолетних дебатов океанологов

1. Роль освещенности

В координатах глубины наблюдается выраженная вертикальная изменчивость максимума хлорофилла А

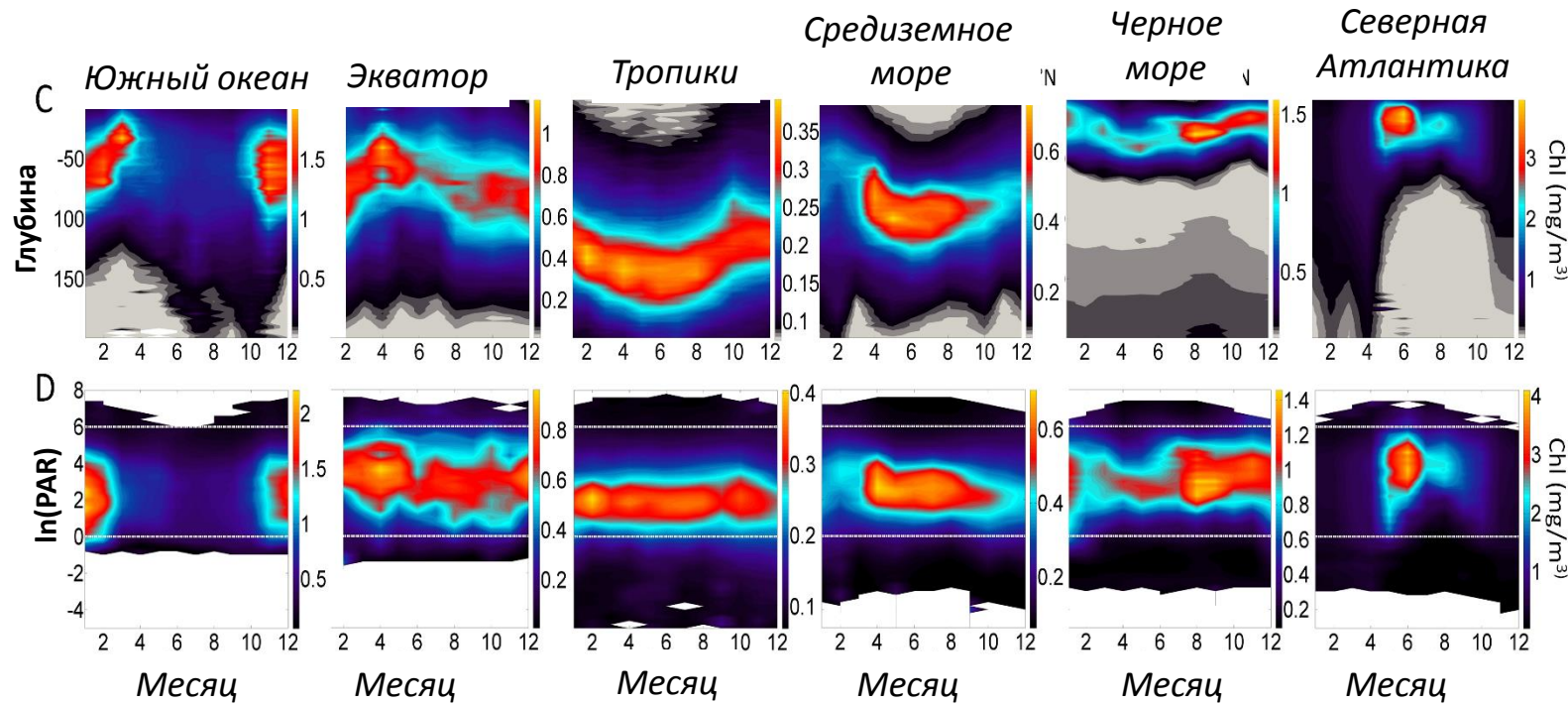


Межгодовая изменчивость Хл в тропиках в координатах глубины и освещенности ($\ln(PAR)$) по данным буев Био-Арго

При переходе в координаты освещенности ($\ln(PAR)$) колебания хлорофилла А практически отсутствуют – естественная координата для фотосинтеза.

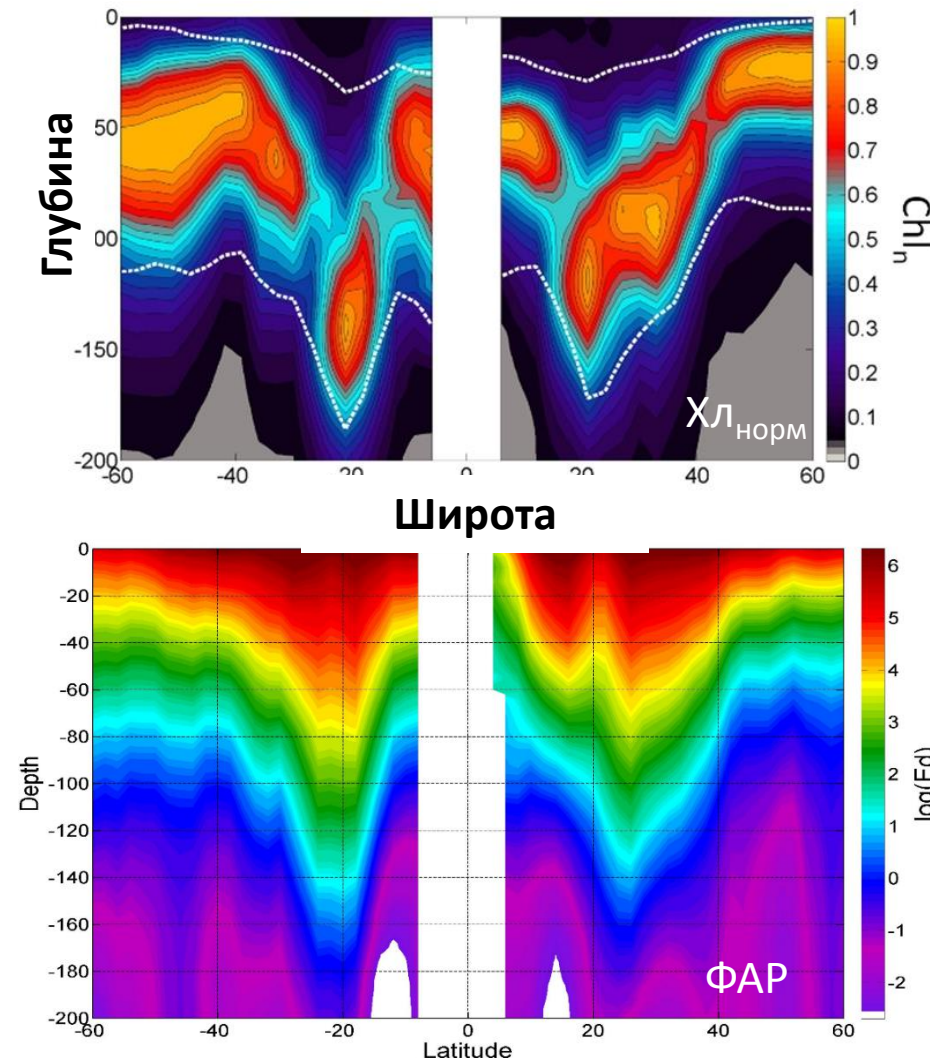
Положение подповерхностного максимума Хл определяется абсолютными значениями освещенности, а его сезонный ход – сезонными изменениями освещенности на поверхности (лето/зима)

Освещенность и вертикальное распределение концентрации хлорофилла А



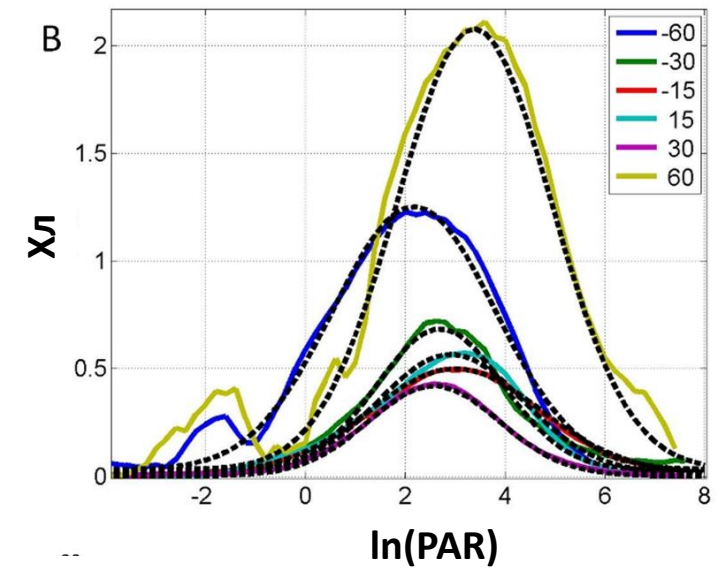
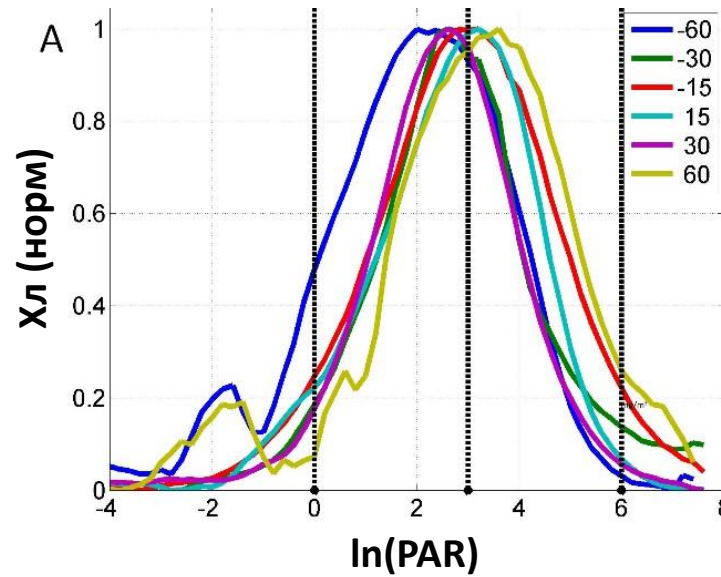
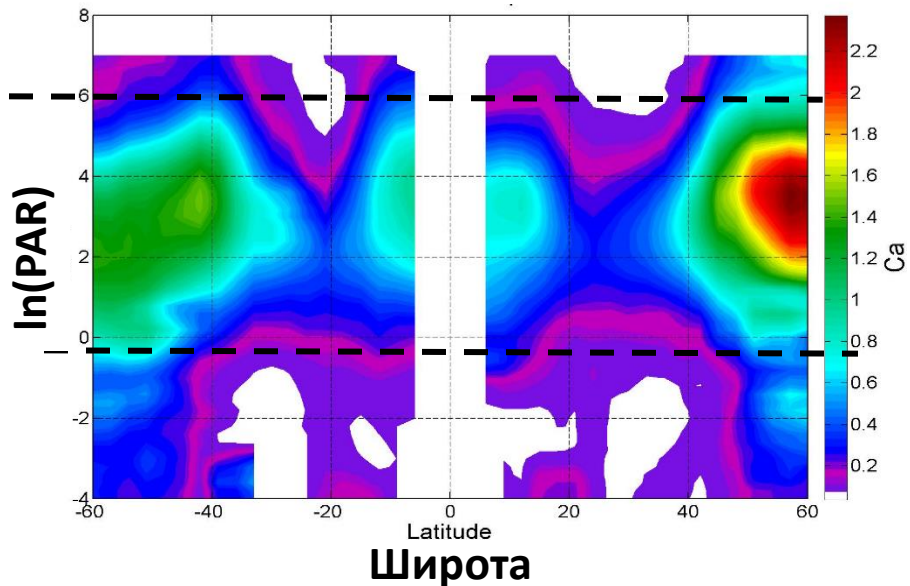
Сезонная изменчивость вертикального распределения Chl в различных районах Мирового океана в координатах глубины и освещенности

Во всех районах Мирового океана и во все сезоны высокие значения концентрации хлорофилла сосредоточены между одними и теми же изолюмами (белые линии)



Широтная изменчивость Chl/Chl_{max} и освещенности. Пунктирные линии – изолюмы.

Универсальная связь между глубинным максимумом хлорофиллом и освещенностью



Широтное распределение вертикального распределения Хл
в координатах освещенности

Зависимость $Хл/Хл_{max}$ и Хл от значений логарифма освещенности
на разных широтах

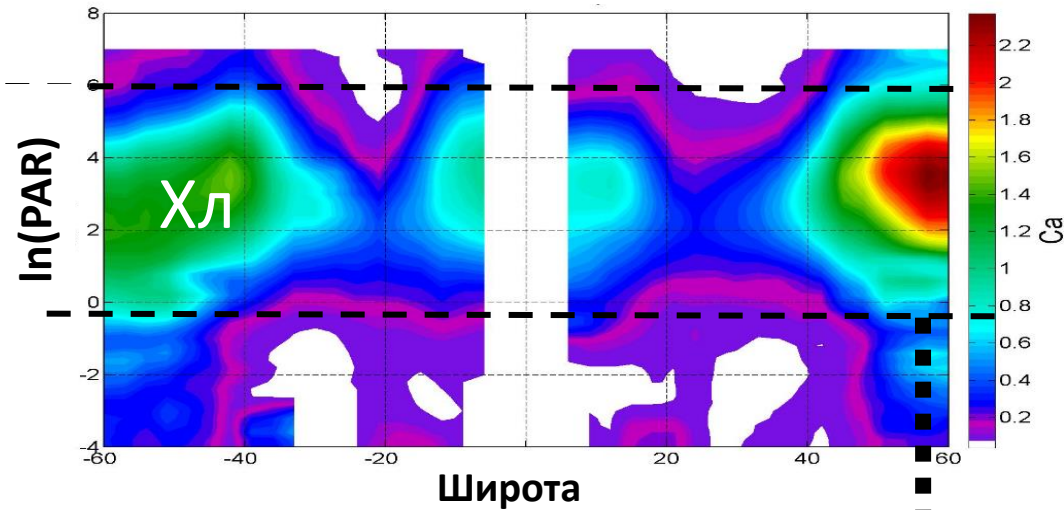
Вариации Хл описываются классической экспериментальной формулой (*Platt et al., 1982*) для **кривой светового насыщения фотосинтеза**:

$$Chl = p * \left(1 - e^{-\frac{a}{p} * I}\right) * e^{-\frac{b}{p} * I} + c$$

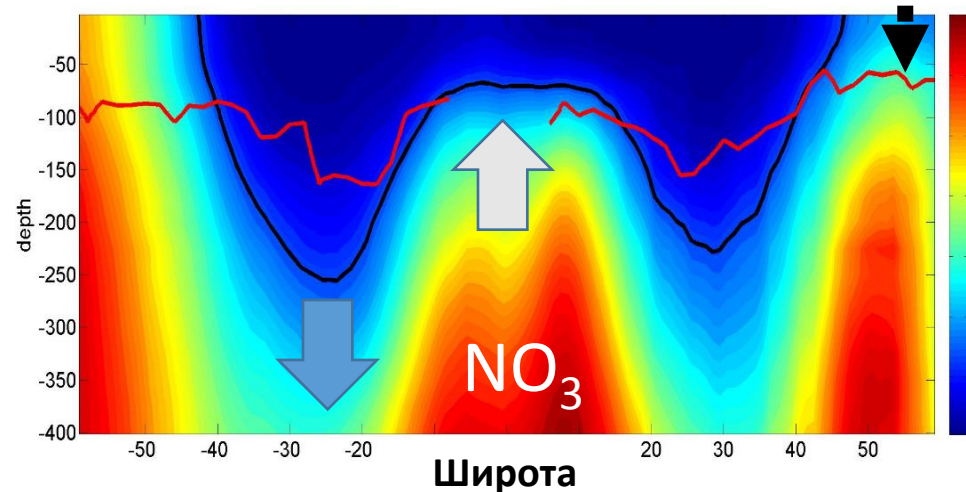
Значения оптимальной, минимальной и максимальной освещенности близки на всех широтах и определяют вертикальное движения максимума Хл на длительных масштабах

Причиной динамики и формирования глубинного максимума хлорофилла – является **рост скорости фотосинтеза и аккумуляция пигментов хлорофилла в слоях оптимальной освещенности**

Величина максимума хлорофилла и концентрация нитратов



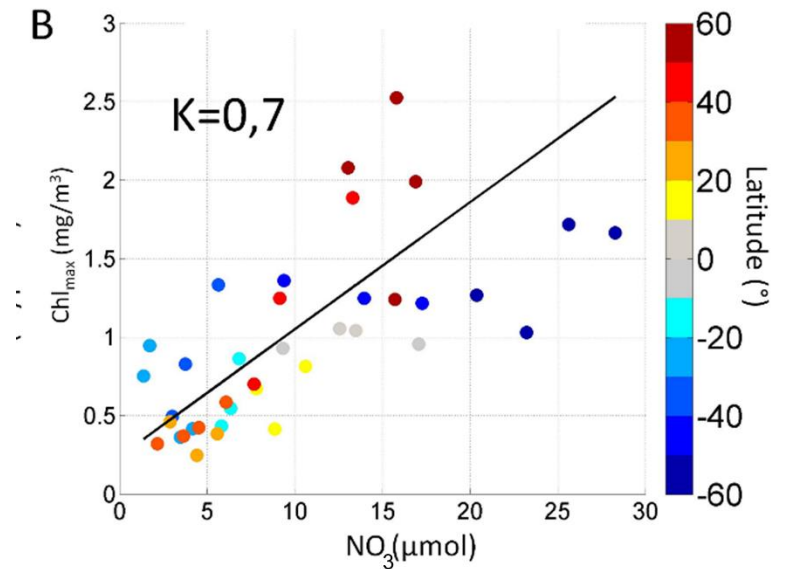
Широтное распределение вертикального распределения Хл в координатах освещенности



Широтное распределение концентрации нитратов по данным WOA13

(красная линия – изолюма $I_{min} \approx 1$ мкмоль фотонов $m^{-2} s^{-1}$)

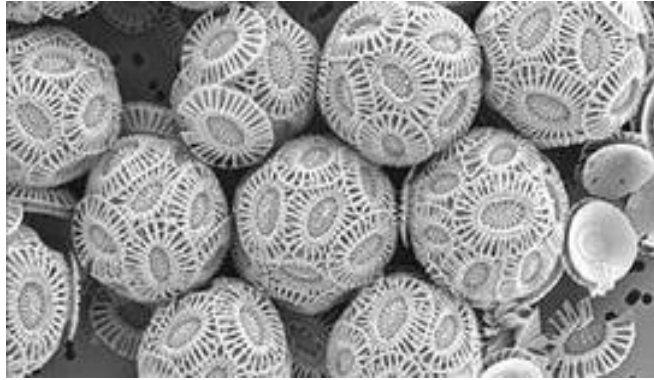
Средняя величина максимума хлорофилла тесно связана с концентрацией биогенных элементов (нитратов, фосфатов и др.) ниже фотической зоны



Зависимость максимума концентрации Хл от концентрации нитратов на глубинах изолумены $I_{min} \approx 1$ мкмоль фотонов $m^{-2} s^{-1}$

2. Вертикальный обмен: экстремальные цветения кокколитофорид в Черном море

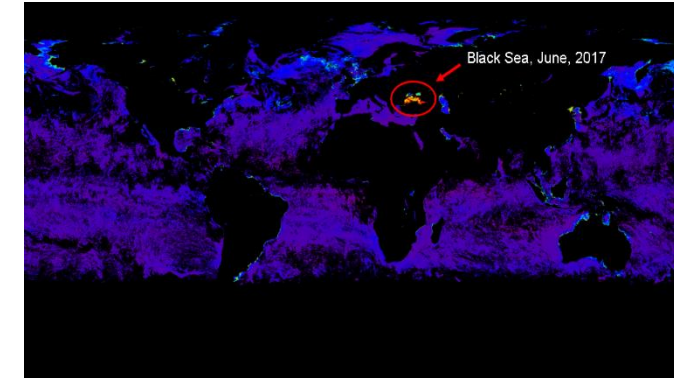
Кокколитофориды используют CO_2 для образования известняковых (CaCO_3) чешуек – кокколит, вызывающих сильное обратное рассеяние света. Оседание кокколит – основная причина “карбонатного насоса”.



Кокколитофориды *E. huxleyi*



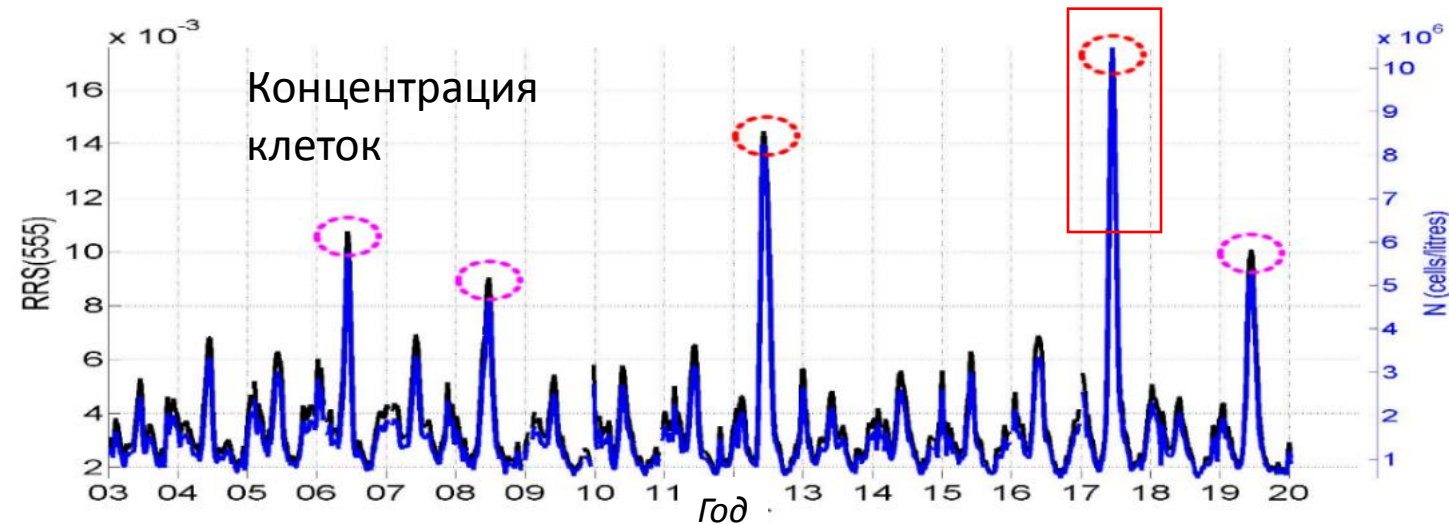
Черное море во время летнего цветения кокколитофорид



Спутниковая яркость MODIS в июне 2017 г.

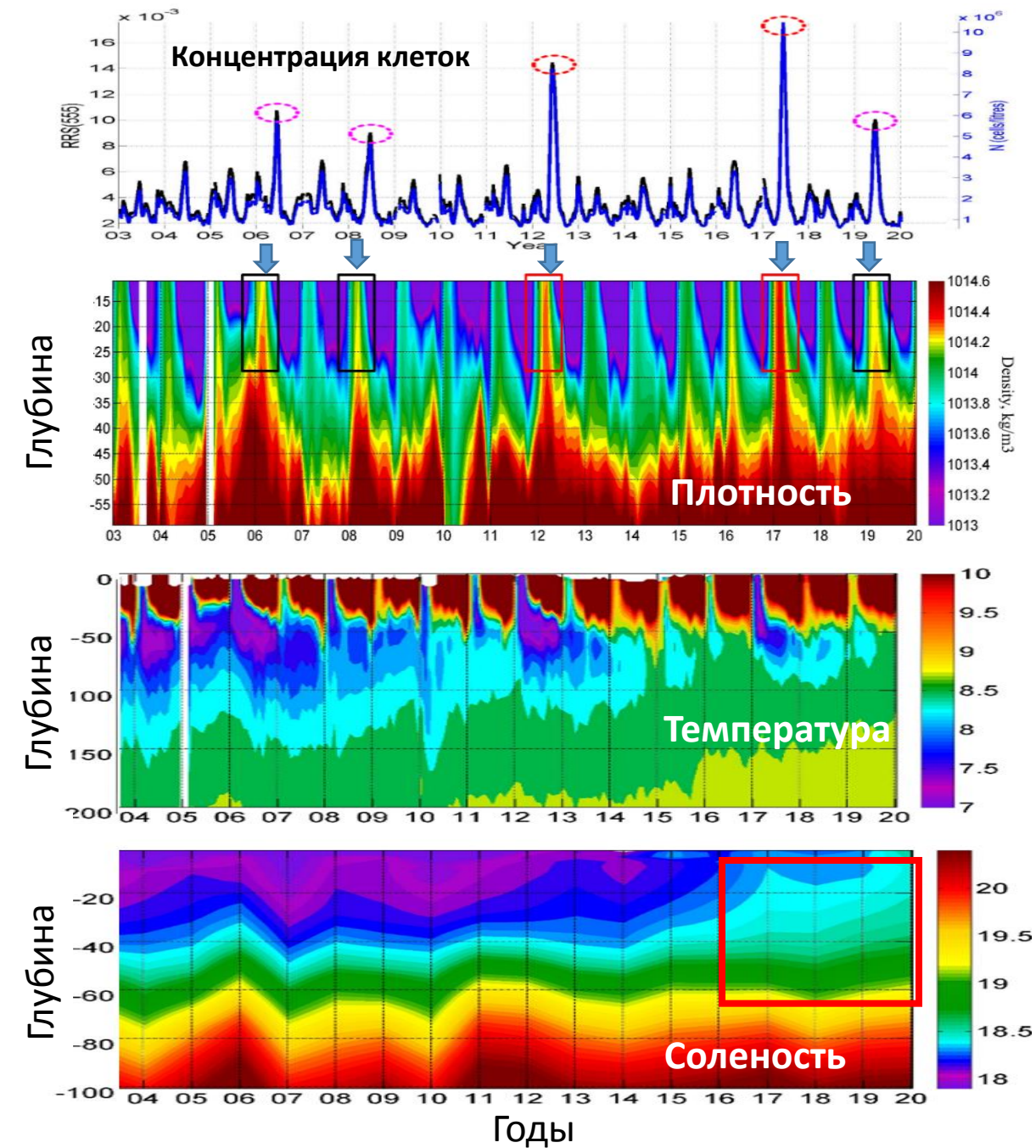
Цветение кокколитофорид имеют значительную межгодовую изменчивость

В последнее время фиксируются рекордные цветения (2012 г., 2017 г.) за спутниковую эру.

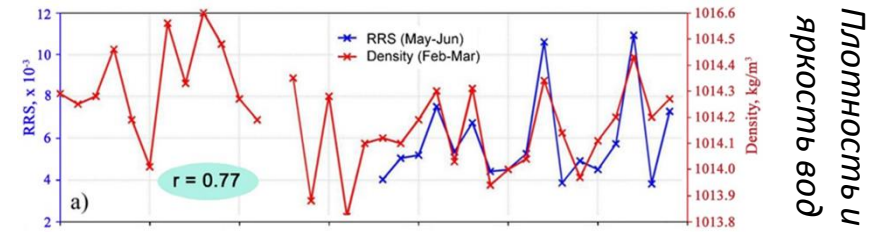


Межгодовые изменения спутниковой яркости в центре Черного моря

Зимняя конвекция и влияние солёности на цветения кокколитофорид

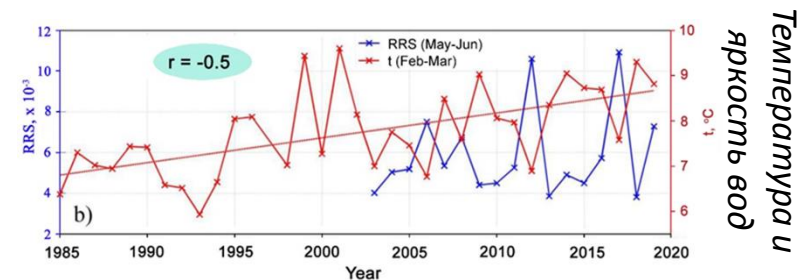


Причина аномальных летних цветений кокколитофорид – выклинивание плотных вод в зимний период в результате конвективного выхолаживания.



Глобальное потепление вызывает долговременный рост температуры – ослабление термической конвекции.

Почему цветения усиливаются?

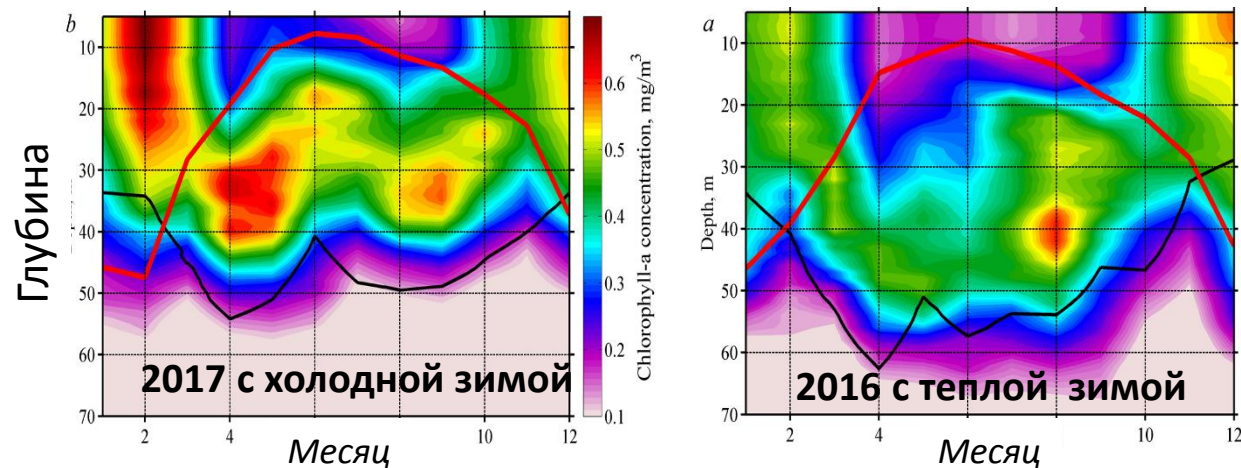


Рост солёности компенсирует ослабление термической конвекции в Черном море и вызывает усиление цветений в последний период. Его важная причина – глобальный рост скорости ветра.

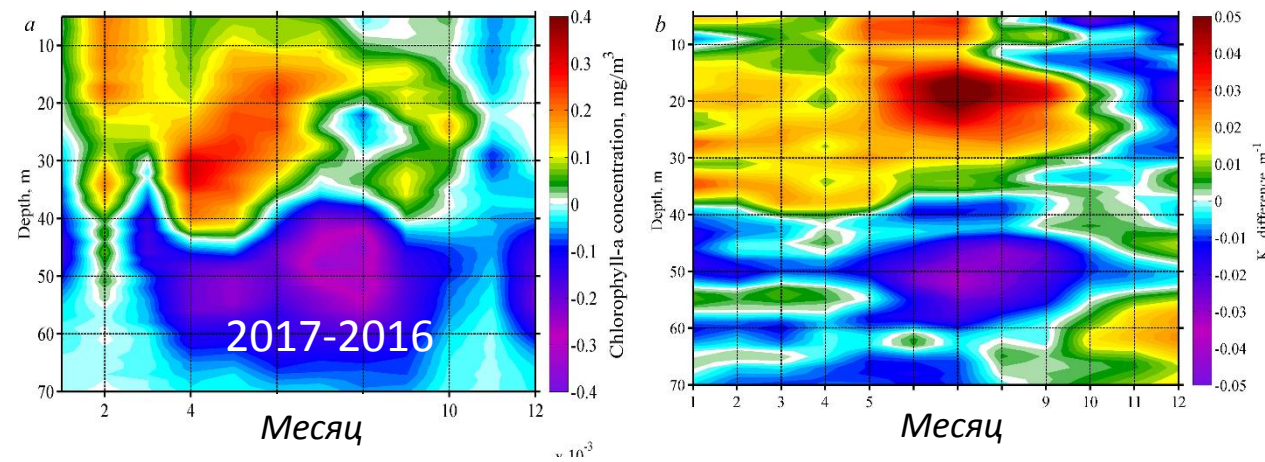
Наблюдающиеся изменения солёности вод могут существенно влиять на биопродуктивность

Конвекция и эффект самозатенения

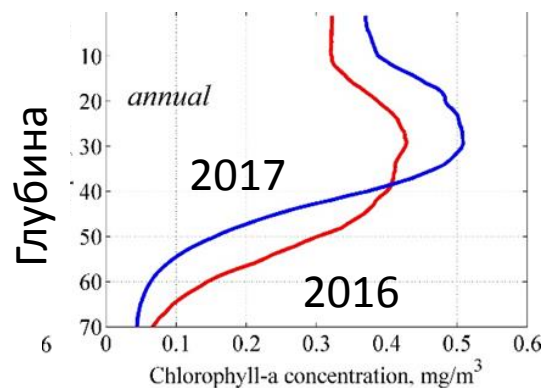
Конвективное вовлечение вызывает весеннее цветение фитопланктона и влияет на изменчивость Хл в течение всего года



Сезонные изменения концентрации Хл в Черном море после холодной и теплой зимы



Сезонные различия Хл (слева) и показателя ослабления света (справа) между 2017 и 2016 гг.



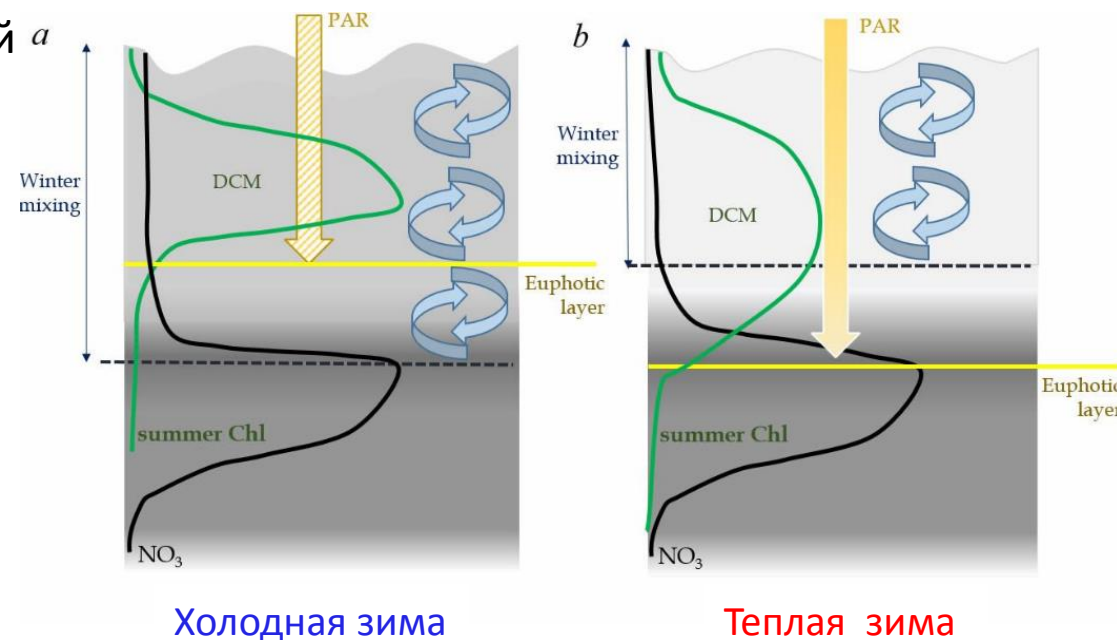
Среднегодовые профили концентрации Хл

после холодной (синий цвет) и теплой зимы (красный цвет)

Уменьшение потока биогенов в зимний период приводит к увеличению прозрачности вод и проникновению света в нижние слои.

Эффект самозатенения компенсирует увеличение Хл в верхних слоях, вызванное конвекцией.

Интегралы Хл равны, а вертикальное распределение различно.

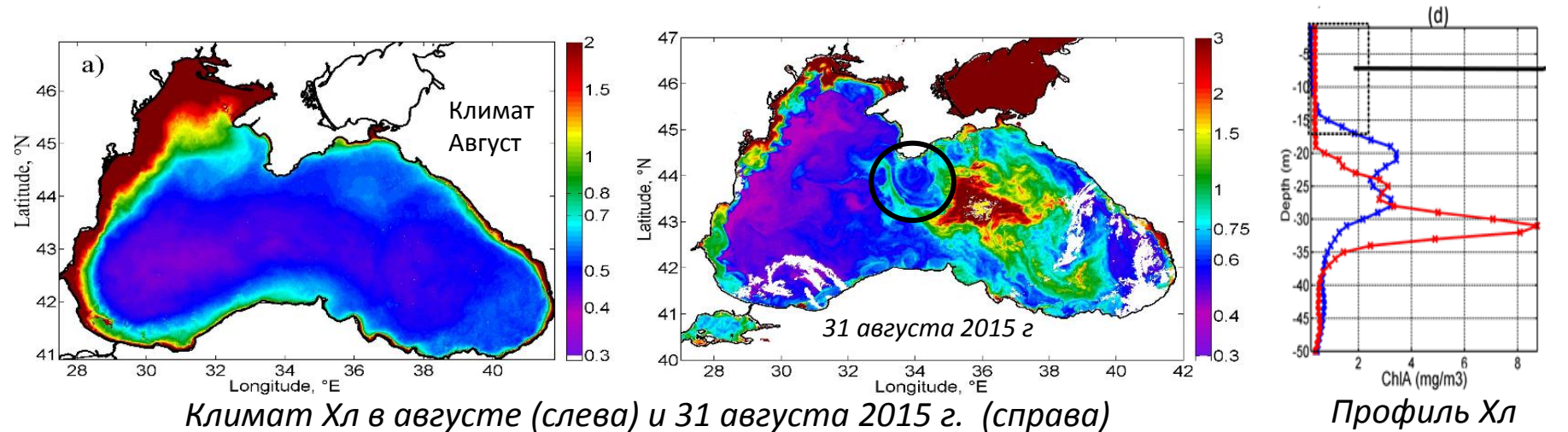
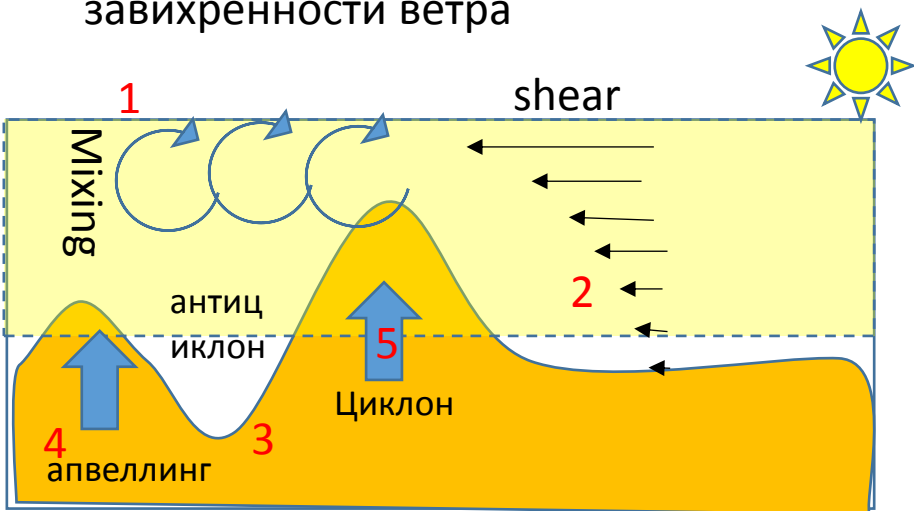


Теплый период года - штормовое воздействие

Усиление штормового воздействия в последние годы приводит к возникновению аномальных цветений фитопланктона в теплый период года. Такие цветения могут длиться несколько месяцев и менять сезонный ход биологических процессов

Физические факторы, влияющие на развитие цветений после шторма:

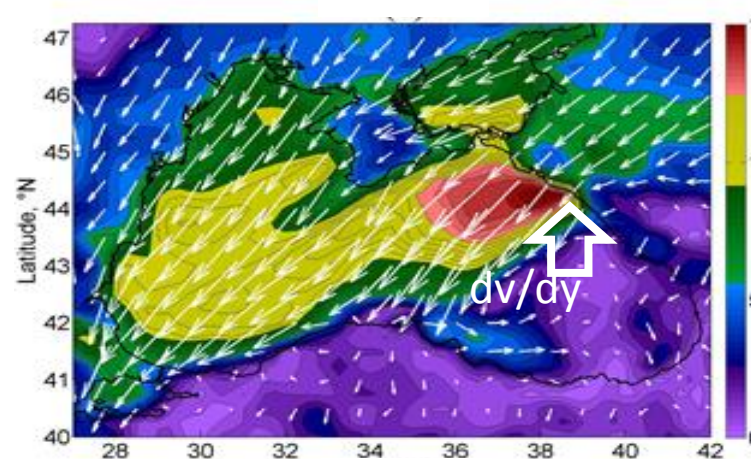
- ✓ ветровое турбулентное перемешивание;
- ✓ сдвиг инерционных течений;
- ✓ локальные апвеллинги;
- ✓ динамическая топография – вихри, круговороты и т.п.;
- ✓ интегральное влияние завихренности ветра



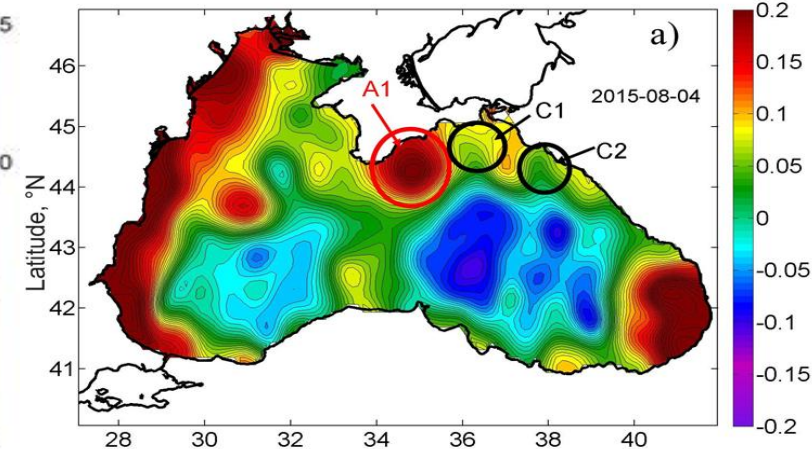
Климат Хл в августе (слева) и 31 августа 2015 г. (справа)

Профиль Хл

до и после шторма



Скорость ветра



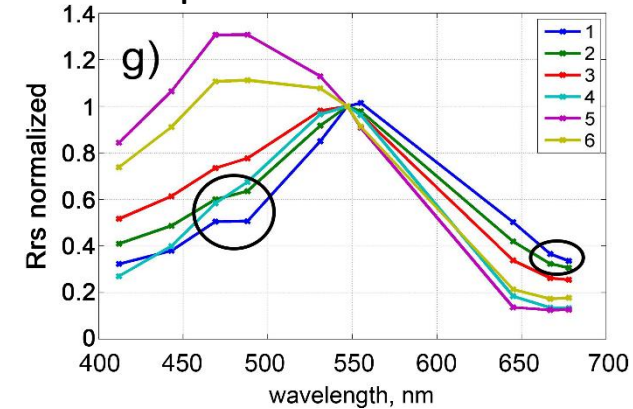
Уровень моря по данным спутниковой альтиметрии

Цветение цианобактерий и их межгодовая изменчивость

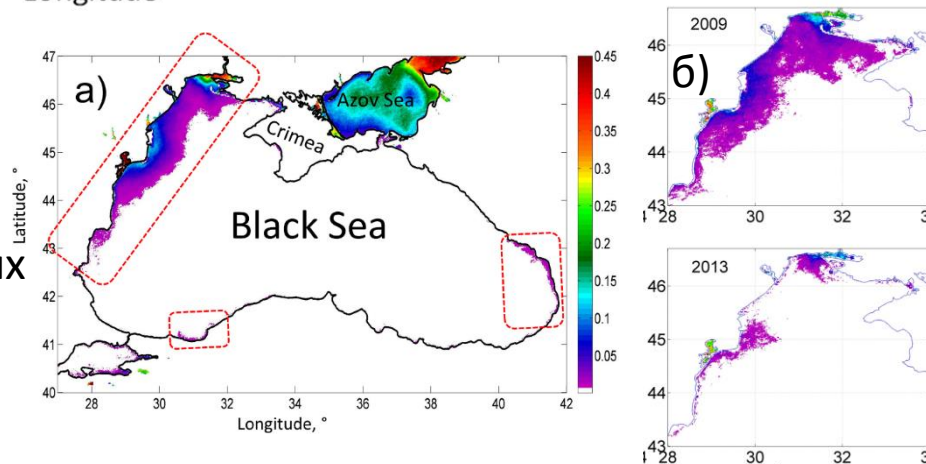
Цианобактерии – потенциально токсичные водоросли, способные вызывать резко негативное влияние на экосистему.

(Матишов, Фуштей, 2008)

На основе спектрального анализа спутниковых оптических измерений определены особенности спектра сине-зеленых и разработан метод их автоматической идентификации

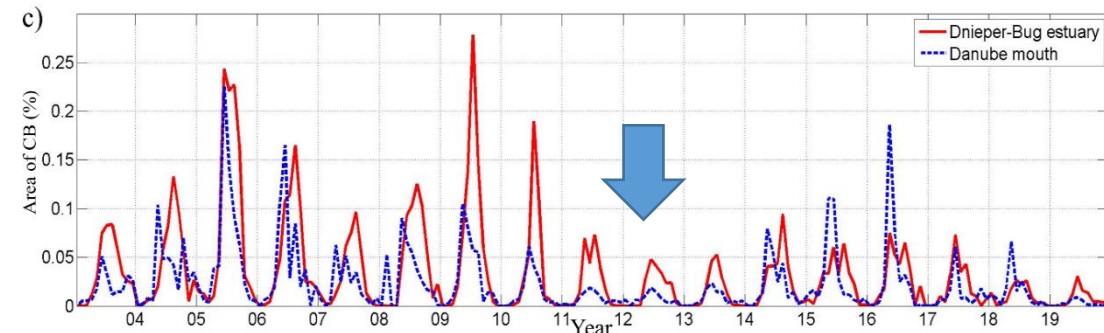


Районы наличия цианобактерий связаны с расположением источников пресных вод и значительно меняются от года к году



Вероятность цветения цианобактерий: а) средняя; б) в отдельные годы -2009, 2013 на основе методов их автоматического выделения

В последние годы их цветение ослабевает, что вызвано усилением скорости ветра и разрушением верхнего стратифицированного слоя

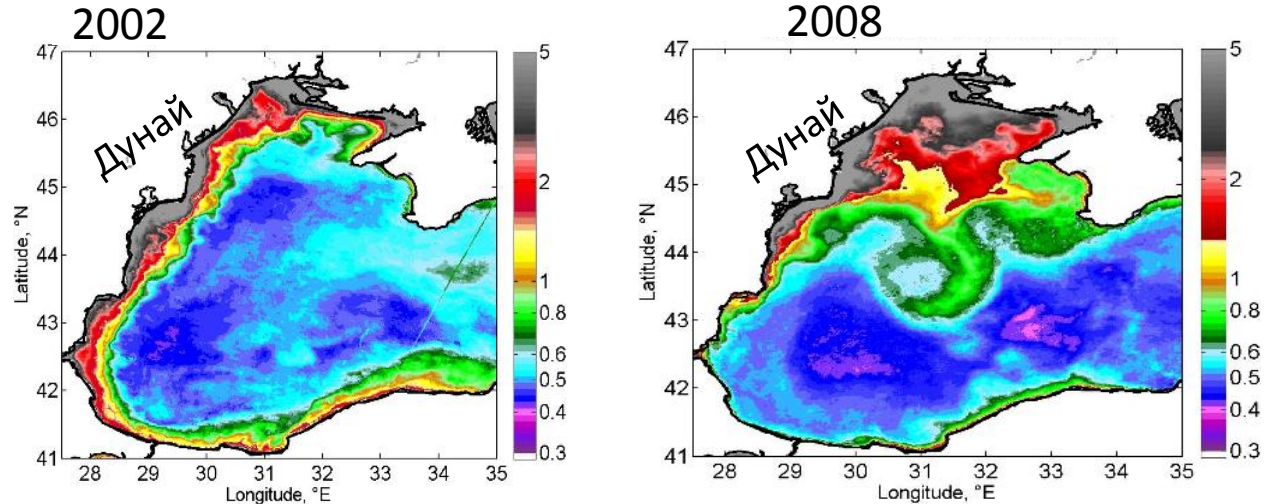


Временная изменчивость цветения цианобактерий в Черном море

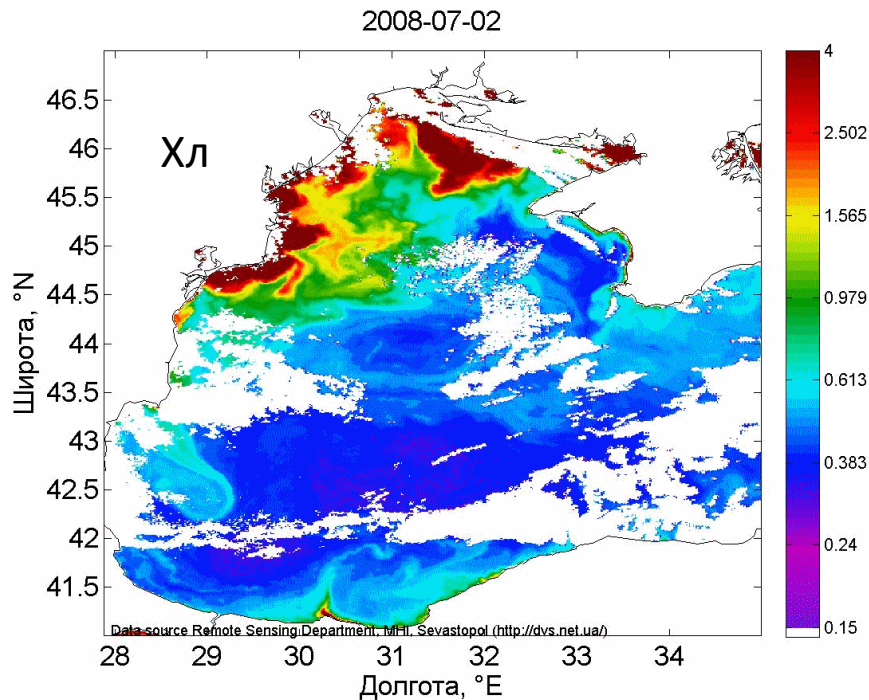
3. Горизонтальный обмен – распространение шельфовых вод

Горизонтальный перенос опресненных речным стоком шельфовых вод - важный внешний источник биогенов.

В Черное море - в отдельные годы речные биогены блокируются на шельфе, а в другие интенсивно переносятся в центр моря



Средняя концентрация хлорофилла летом 2002 и 2008 г

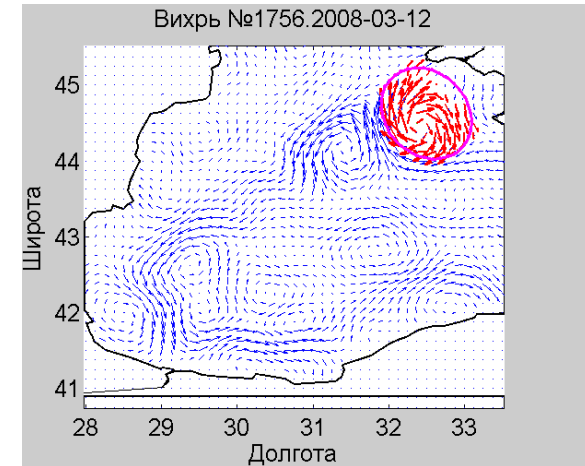
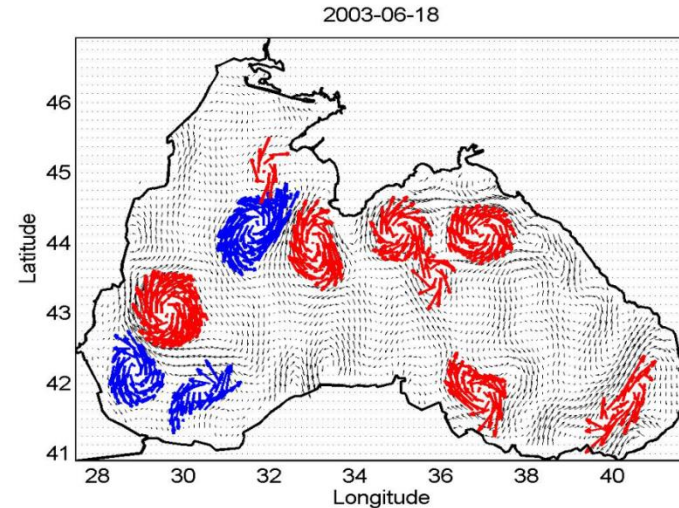


Поток шельфовых вод, вызванный одним антициклоном может в 50 раз превышать сток Дуная (*Shapiro et al., 2009*)

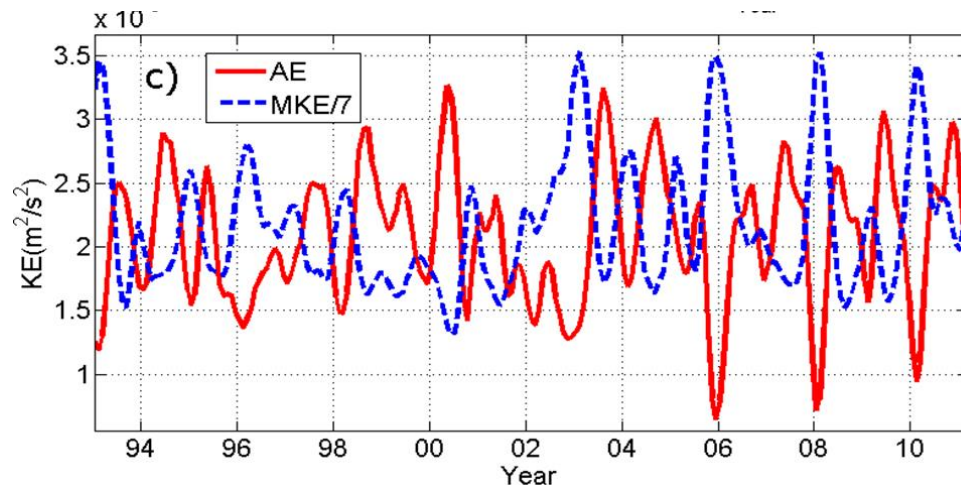
Причина - межгодовая изменчивость интенсивности вихревой динамики

Взаимосвязь крупномасштабной и вихревой динамики вод в Черном море

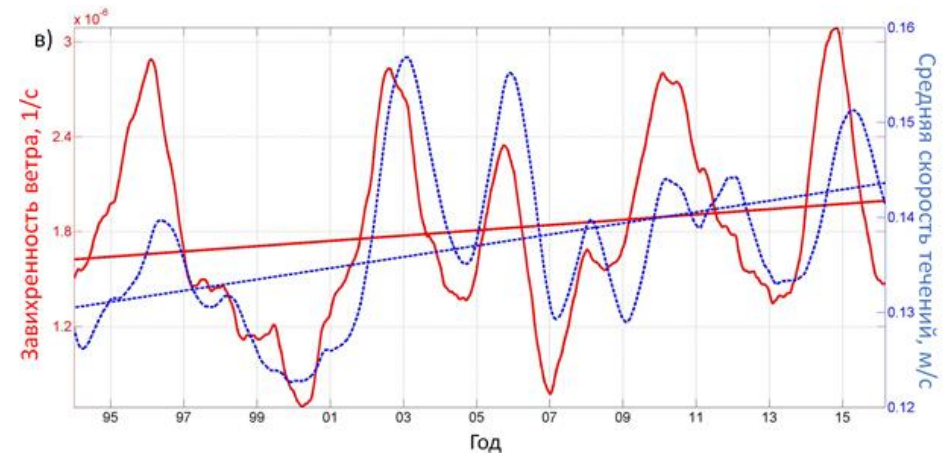
Для исследования вихревой динамики активно используются разработанные методы их автоматической идентификации, основанные на данных спутниковых альтиметров



Пример карты идентифицированных вихрей и траектории вихря

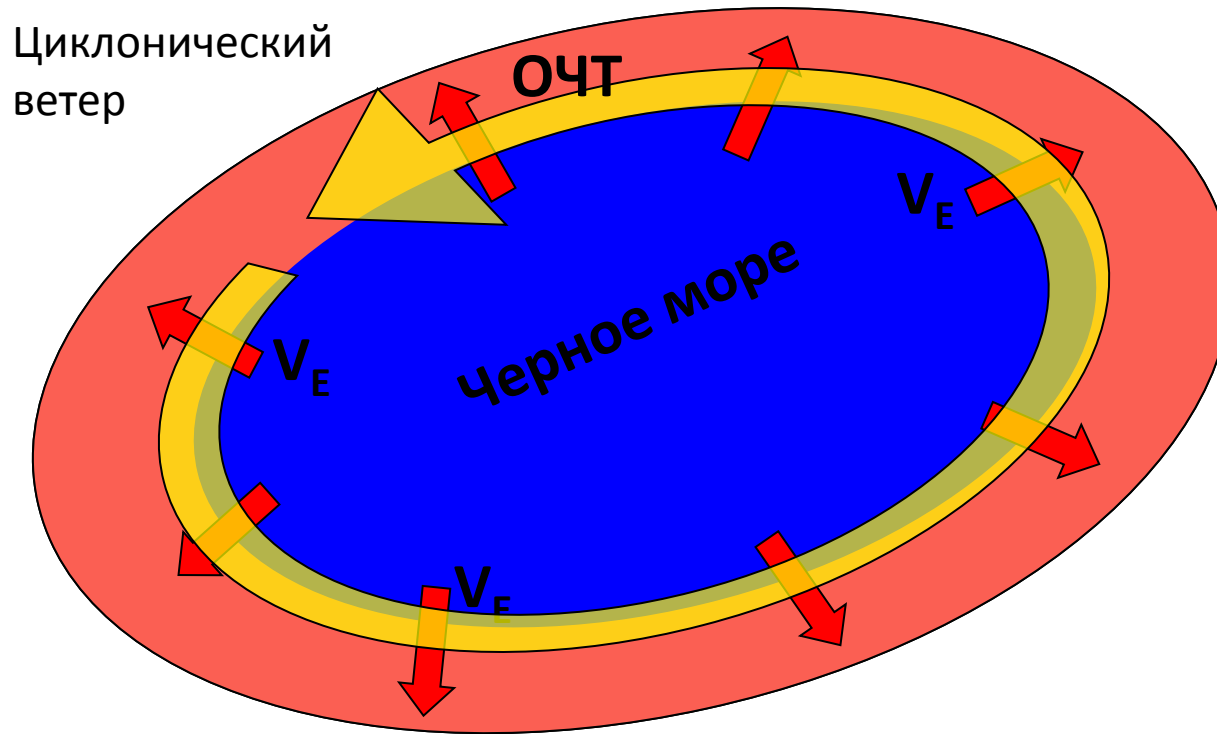


Межгодовая изменчивость количества антициклонов (красная линия) и средней кинетической энергии течений (синяя)



Временная изменчивость завихренности ветра (красная линия) и средней кинетической энергии (МКЕ) течений (синяя)

Интенсификация синоптических антициклонов наблюдается при ослаблении завихренности ветра и крупномасштабных течений

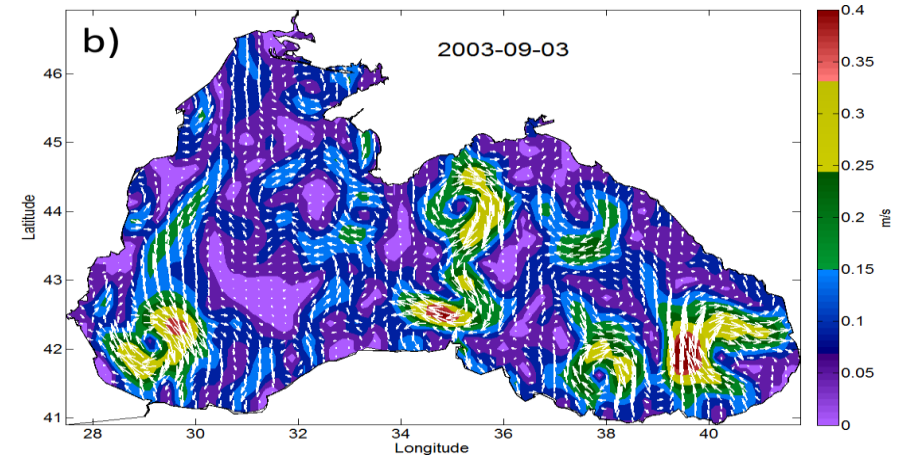
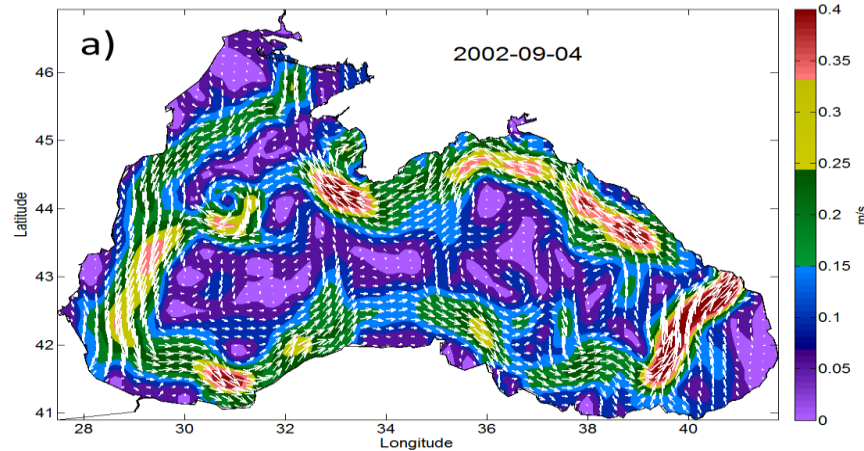
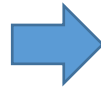


1) Усиление завихренности ветра вызывает интенсификацию циклонического ОЧТ

2) Ослабление циклонического ветра - потоки отрицательной плавучести в центр моря - — генерация антициклонов - рост горизонтального обмена

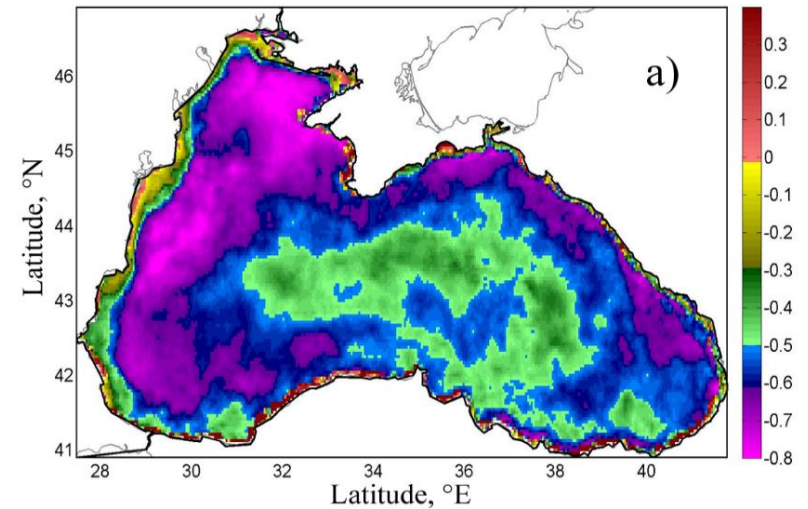
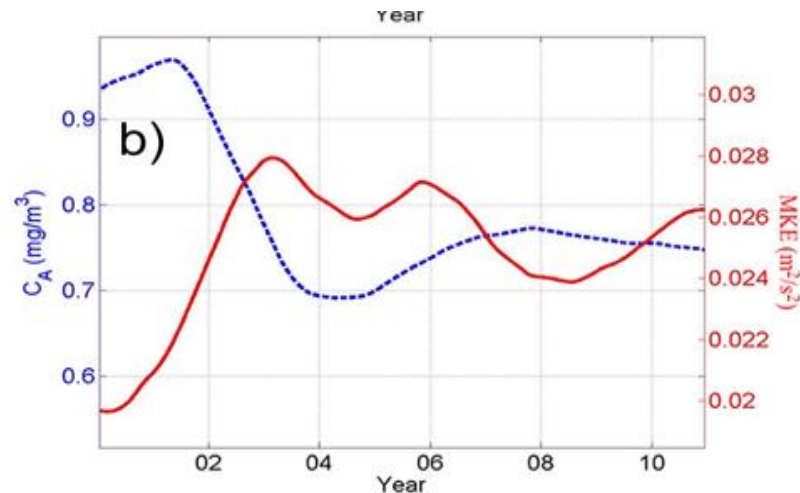
Изменение структуры бассейновой циркуляции и её влияние на экосистему

Два режима циркуляции
Черного моря: “струйный”
и “вихревой” при
сильной/слабой
завихренности ветра



Карты скоростей течений Черного моря в сентябре 2002 г. и 2003 г. по данным спутниковой альтиметрии

На межгодовых масштабах
усиление завихренности ветра
и течений приводит к
уменьшению концентрации
хлорофилла А, подавляя
горизонтальный речных
транспорт биогенов

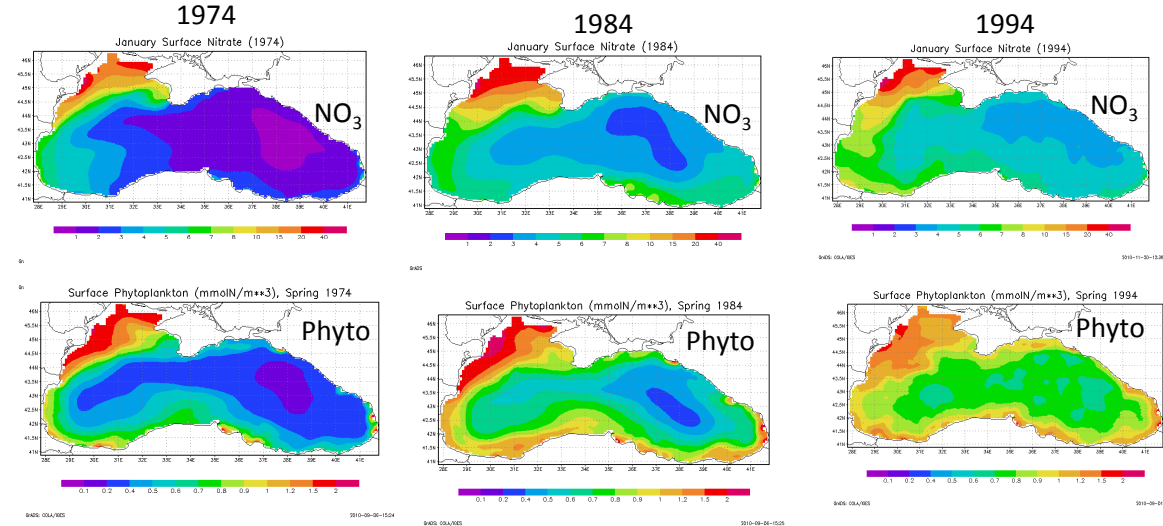


В годы с минимумом завихренности ветра в Черном море наблюдались наиболее аномальные ситуации: вселение и рост гребневиков *Mnemiopsis leydyi* (1983 г., 1989 г.), *Beroe ovata* (1998-2002 гг.) (Oguz et al., 2008), максимальная популяцией мезозoopланктона (Oguz et al., 2006) и др.

Проблемы и перспективы

Настоящий доклад демонстрирует лишь часть физических процессов, оказывающих влияние на изменчивость характеристик морских экосистем.

Комплексное исследование взаимосвязи атмосферных, гидрофизических, биологических процессов возможно на **основе совместных численных физико-биогеохимических моделей, которые развиваются и в России.**



Средняя концентрации фитопланктона и нитратов в Черном море в 1984, 1992, 2000 гг. по данным моделирования (МГИ РАН, Дорофеев и др., 2010)

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

Качество моделирования ограничено - пробелы в описании ряда биохимических процессов – трансформации органического вещества, механизмов фотоадаптации и других

Исследование этих процессов требует

- ✓ развития и внедрения регулярных заякоренных измерений гидрофизических и биологических параметров
- ✓ новых методов экспресс-анализа химического состава;
- ✓ новых методов автоматического определения состава фитопланктона...

Благодарю за внимание

Кубряков Арсений Александрович

зав. лаб. инновационных средств и методов
океанологических исследований,
ФИЦ “Морской гидрофизический Институт РАН”,
г. Севастополь

Будем рады сотрудничеству
arskubr@ya.ru