

# **Влияние физических факторов на биологические характеристики морских экосистем**

**Кубряков Арсений Александрович**

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

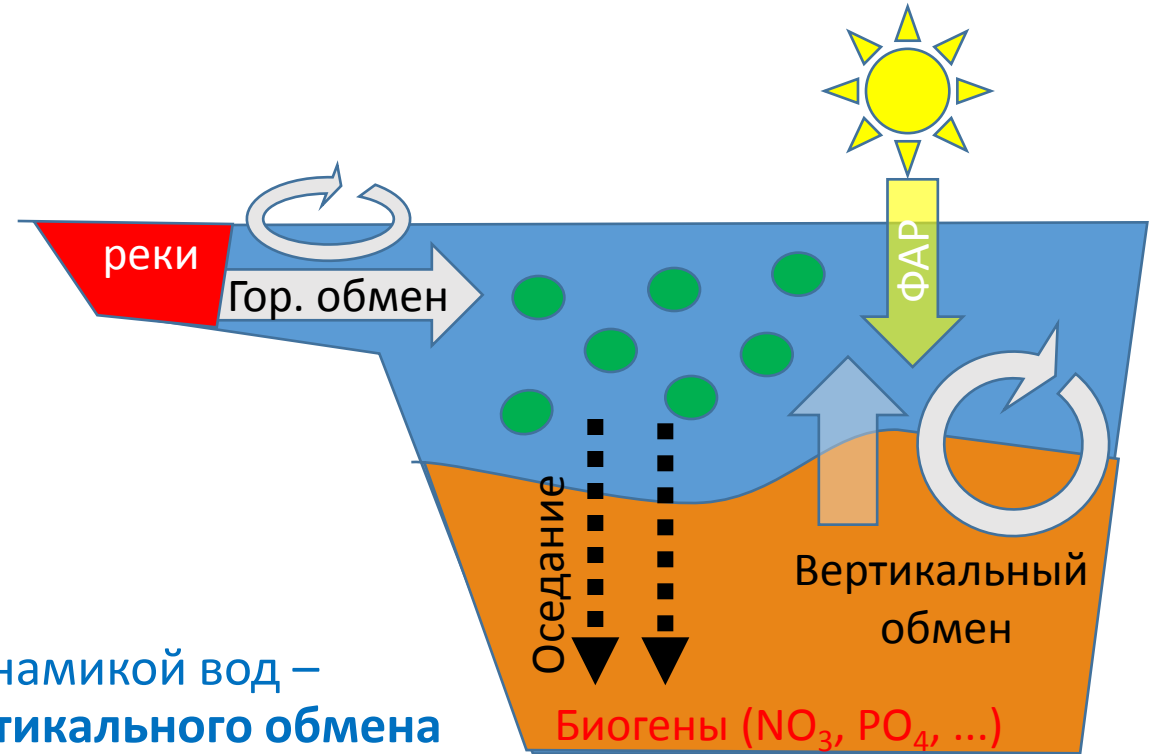
**Президиум Российской Академии Наук**

9 февраля 2022 г.

Биопродуктивность океана существенно влияет на углеродный цикл на нашей планете. Океан является “биологический насосом”, который поглощает почти половину атмосферного  $\text{CO}_2$  за счет фотосинтеза (*Field et al., 2008*).

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

- ✓ освещенности;
- ✓ потоков биогенных веществ, связанных с динамикой вод – процессами горизонтального обмена и вертикального обмена

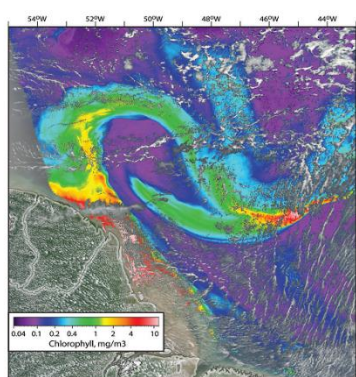


**Цель доклада** – продемонстрировать примеры комплексного воздействия различных физических факторов на *изменчивость* биологических характеристик морских экосистем

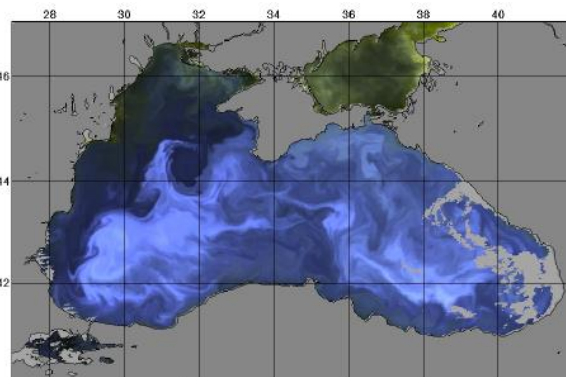
# Современные автоматизированные средства контроля морской среды

**Спутниковые измерения.** Спутниковые приборы осуществляют площадные измерения различных характеристик океана

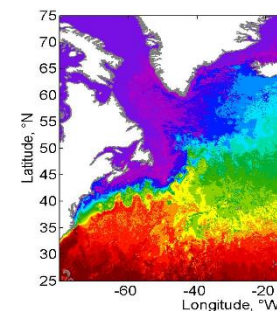
## Оптические характеристики



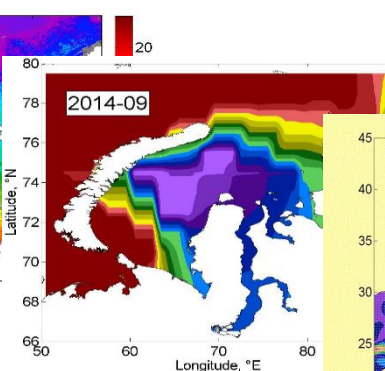
Плюм реки Амазонка



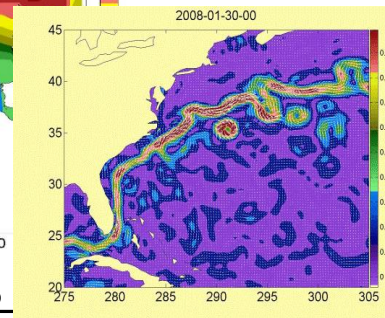
Кокколитофориды в Черном море



Температура

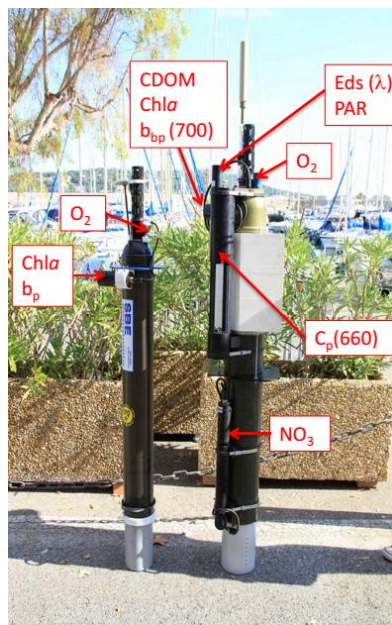


Соленость



Скорость течений и др.

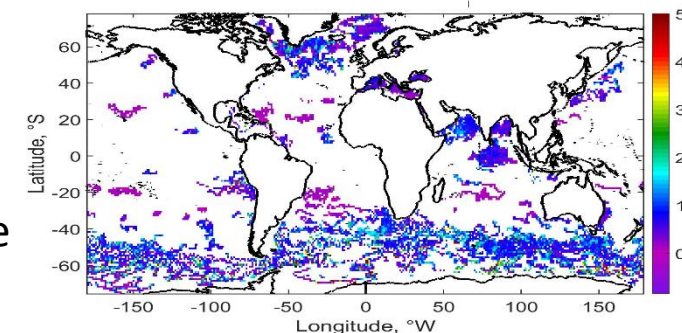
## Буи-профилемеры Био-Арго



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

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

- 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.



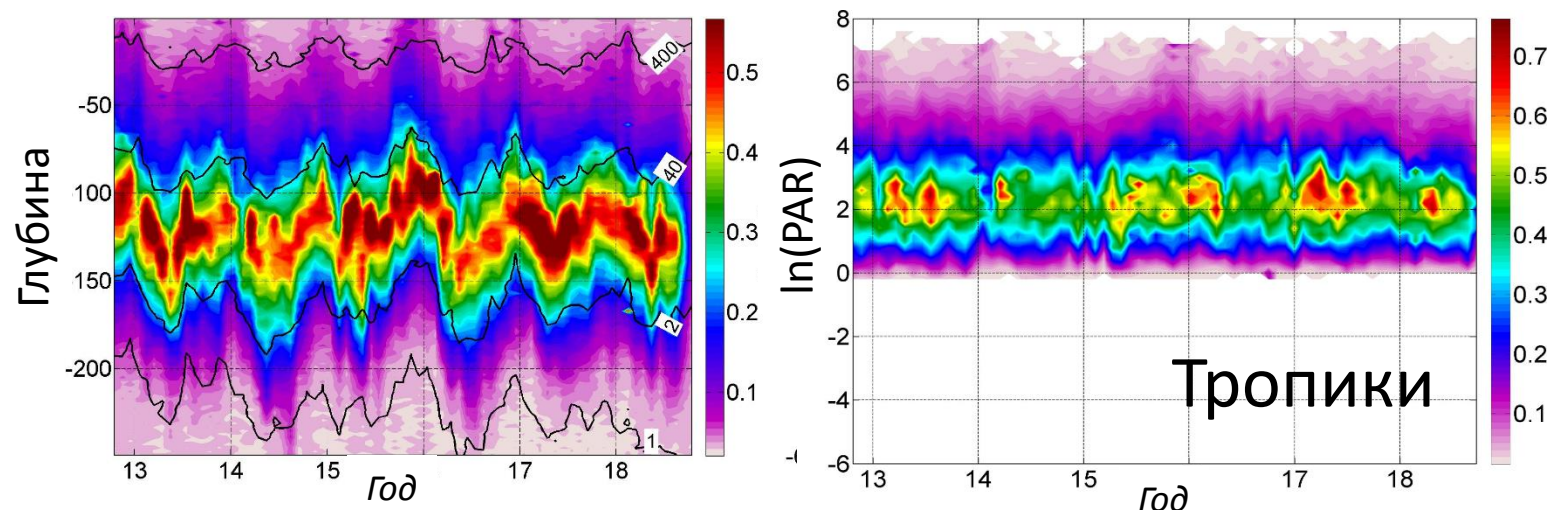
Концентрация Хл на глубине 50 м



# 1. Освещенность и вертикальное распределение концентрации хлорофилла А (Хл)

В тропической части наблюдается сильная вертикальная изменчивость Хл (с амплитудой до 100 м).

В координатах освещенности ( $\ln(\text{ФАР})$ ) вертикальные колебания практически отсутствуют, а изменчивость Хл выглядит как широкая прямая полоса

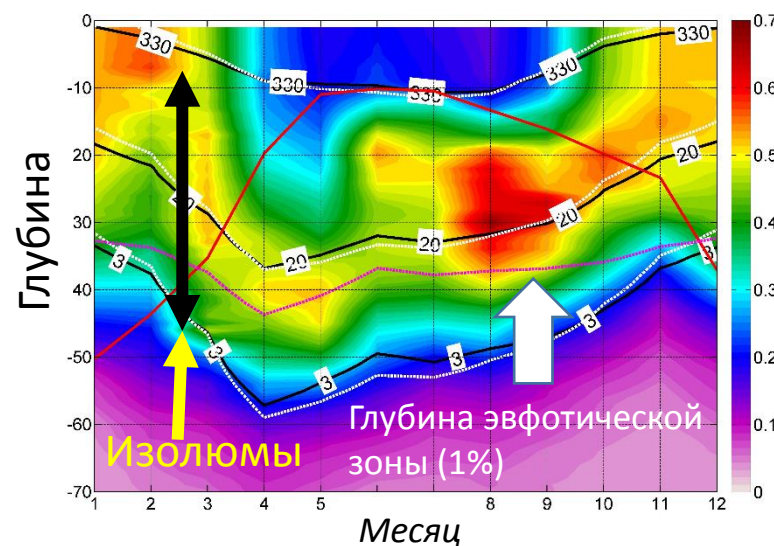


Межгодовая изменчивость Хл в тропиках в координатах глубины и освещенности ( $\ln(\text{ФАР})$ ) по данным буев Био-Арго

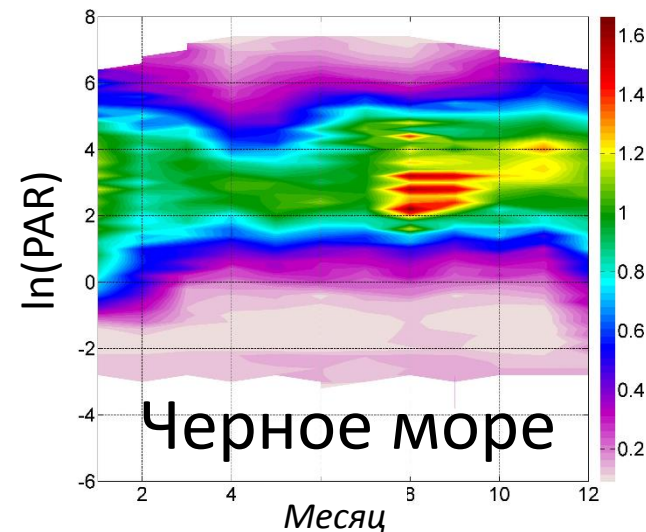
**Глубина эвфотической зоны – 1%**  
от освещенности на поверхности

Классическое определение эвфотической зоны не описывает реальную динамику максимума Хл

Положение подповерхностного максимума Хл определяется абсолютными значениями освещенности

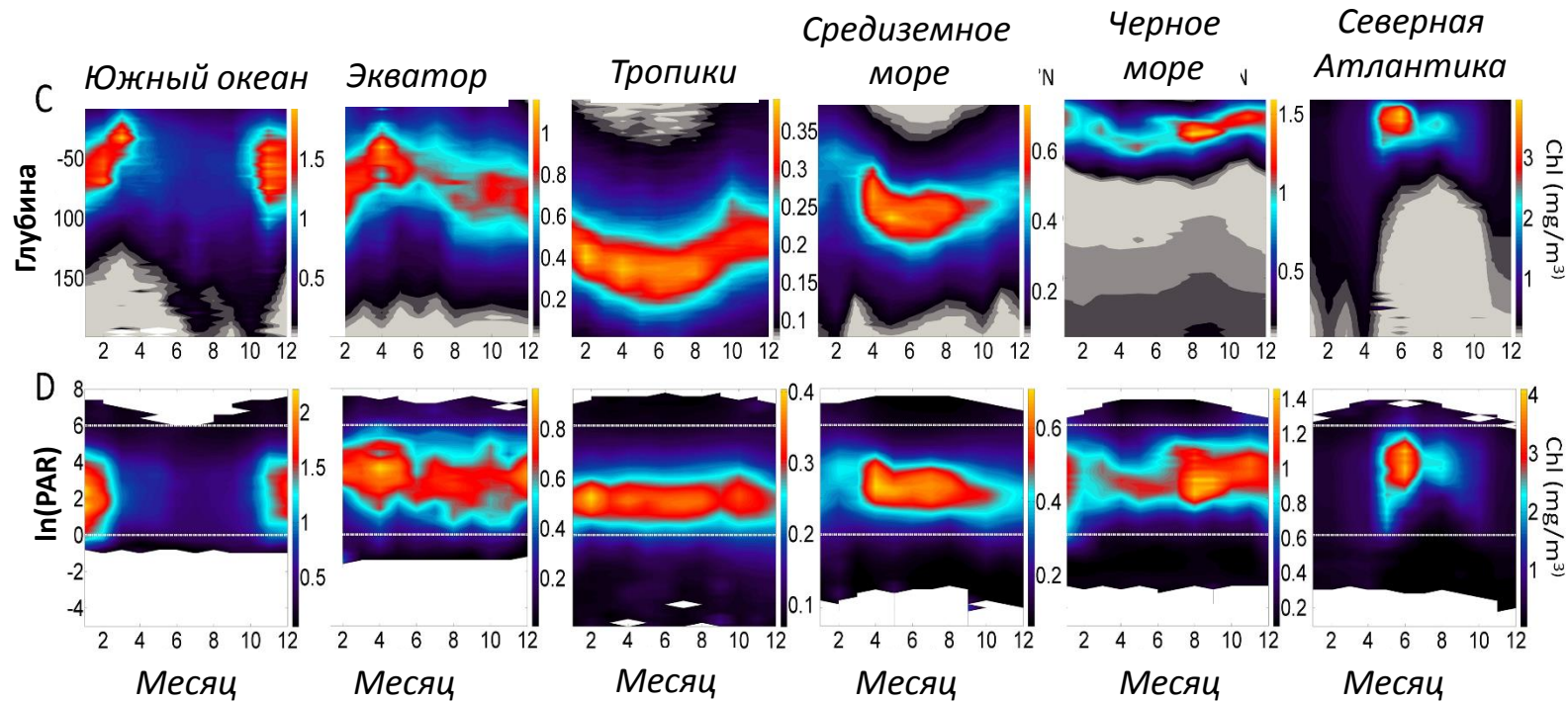


Сезонная изменчивость вертикального распределения Хл в Черном море в координатах глубины и освещенности ( $\ln(\text{ФАР})$ )

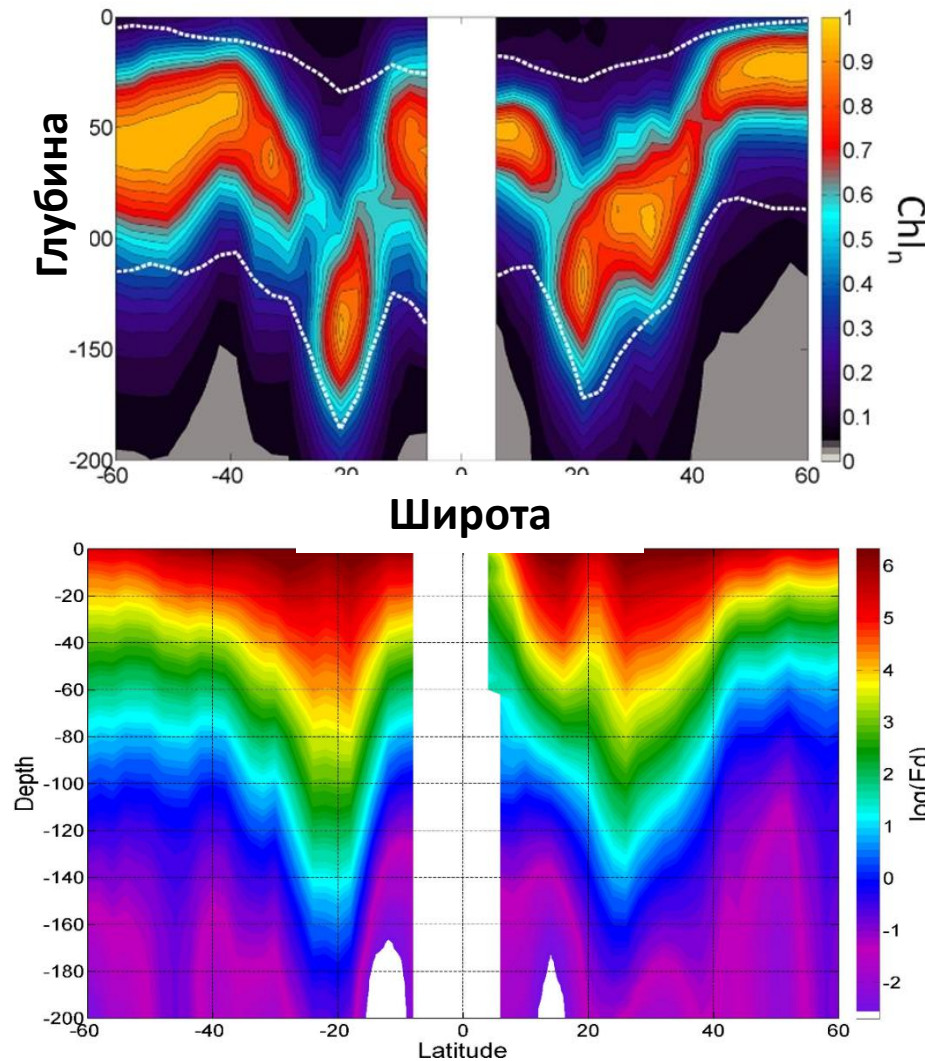


Черное море

# Освещенность и вертикальное распределение концентрации хлорофилла А (Хл)



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

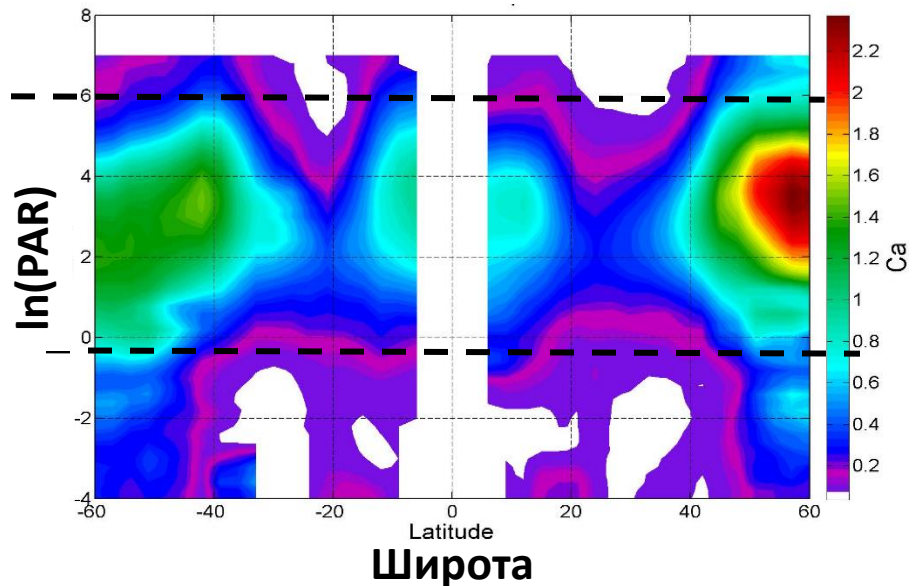


*Широтная изменчивость  $Хл/Хл_{max}$  и  
освещенности. Пунктирные линии –  
изолюмы.*

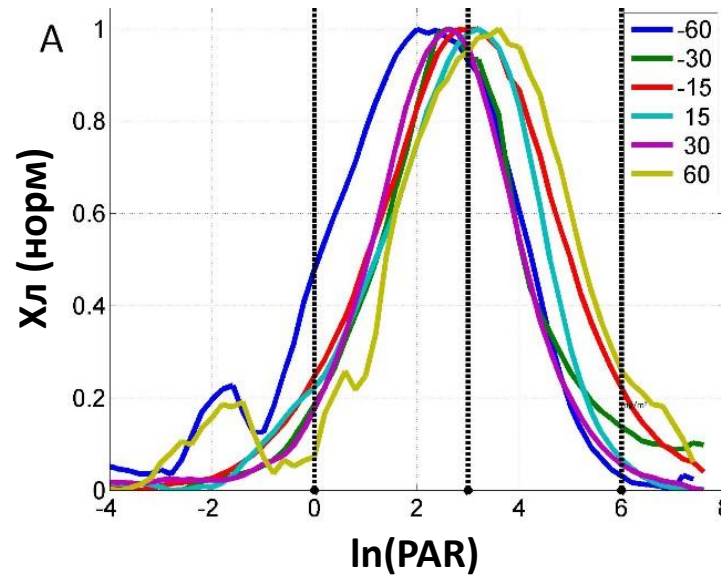
**Во всех районах Мирового океана и во все сезоны  
высокие значения концентрации хлорофилла  
сосредоточены между одними и теми же  
изолюмами (белые линии)**



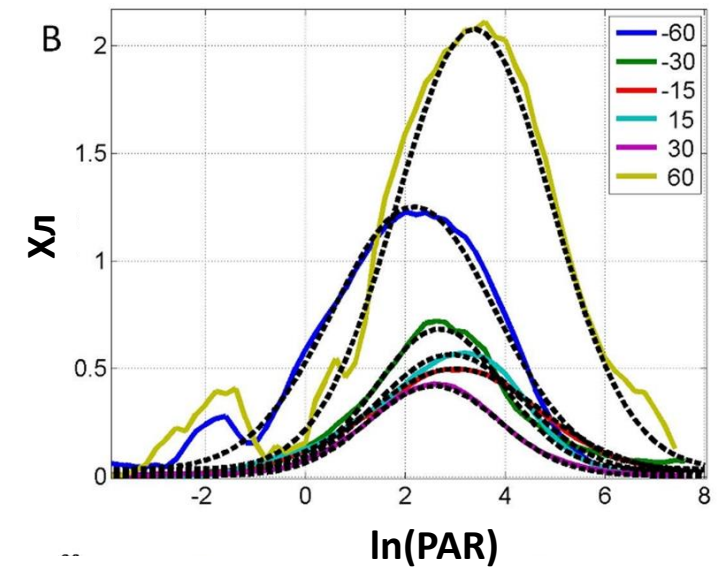
# Универсальная связь между Хл и ФАР



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**:

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

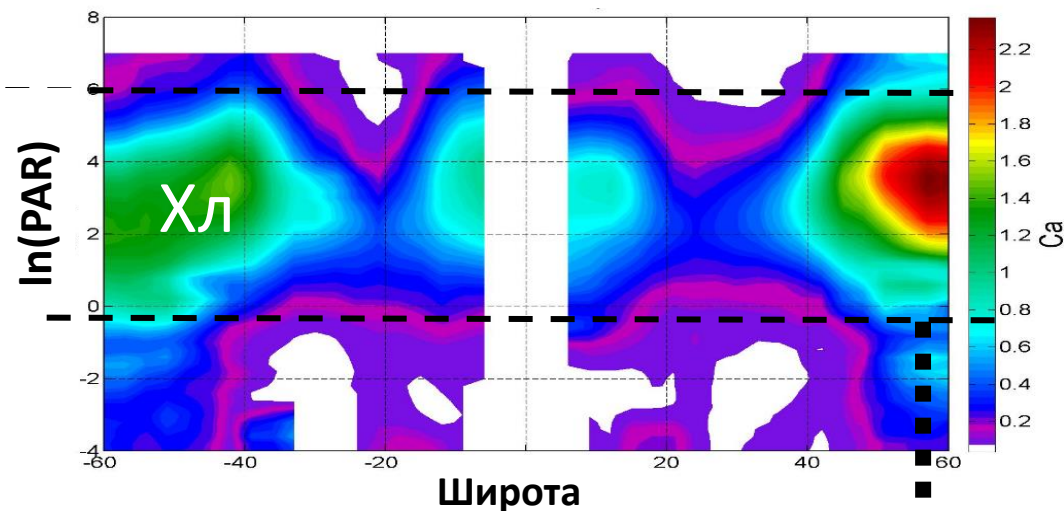
Оптимальная освещенность

$$I_{opt} = Chl_{max} / a * \log((a + b) / b) \approx 10-30 \text{ мкмоль фотонов м}^{-2} \text{ с}^{-1}$$

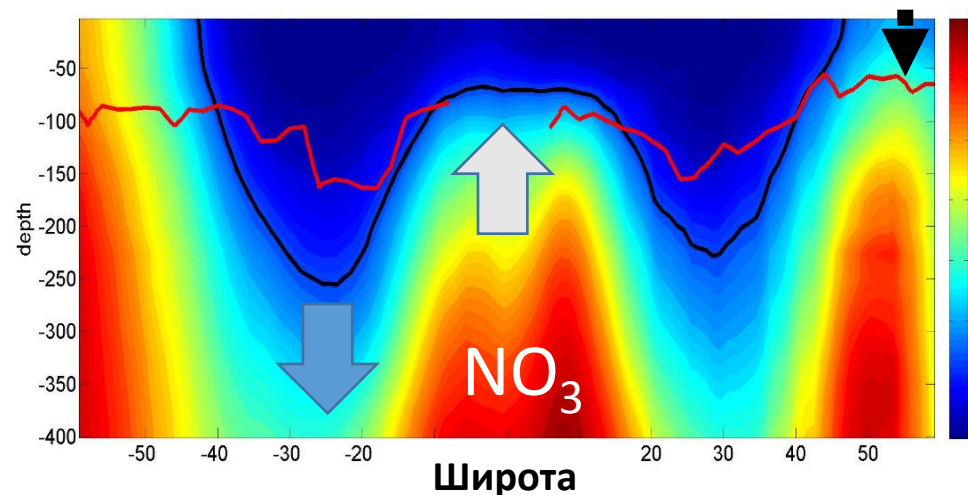
Эти результаты свидетельствуют, что важной причиной появления подповерхностного максимума являются **аккумуляция пигментов Хл в слоях оптимальной освещенности, где скорость фотосинтеза выше**

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

# Глобальная связь между величиной максимума Хл и концентрацией нитратов



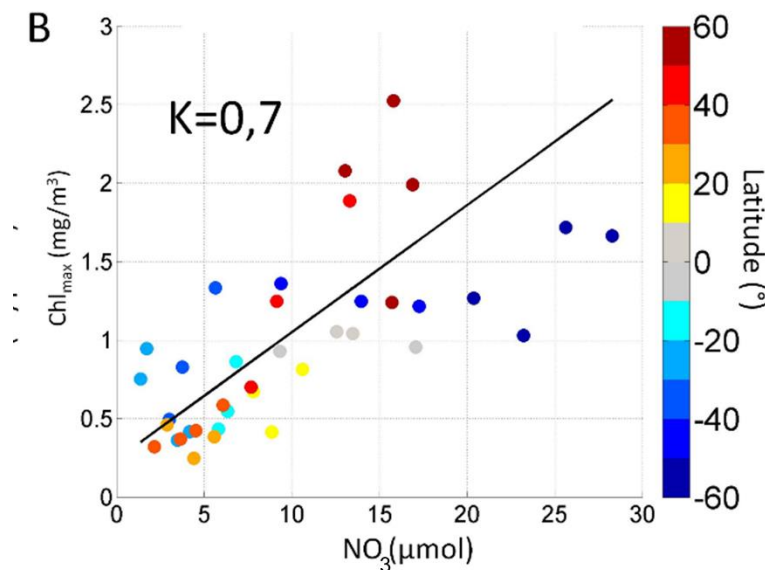
Широтное распределение вертикального распределения Хл в координатах освещенности



Широтное распределение концентрации нитратов по данным WOA13

(красная линия – изолюма  $I_{\text{min}} \approx 1$  мкмоль фотонов  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$ )

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

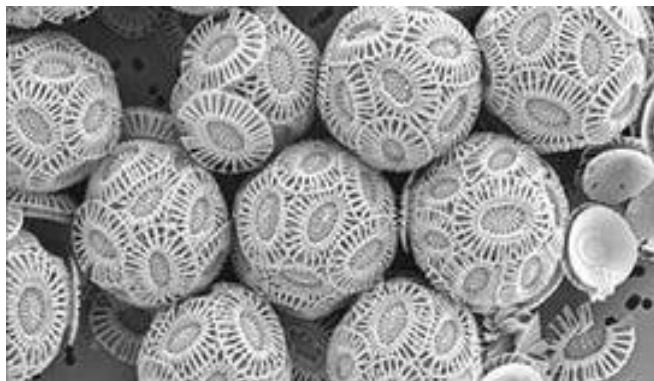


Зависимость максимума концентрации Хл от концентрации нитратов на глубинах изолюмы  $I_{\text{min}} \approx 1$  мкмоль фотонов  $\text{м}^{-2} \text{с}^{-1}$

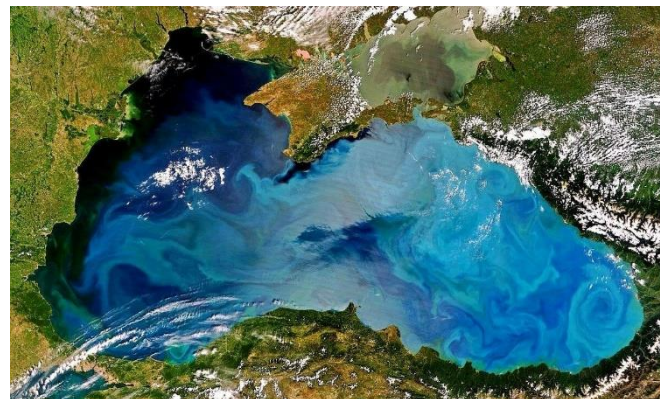


## 2. Вертикальный обмен: зимняя конвекция и ее влияние на экстремальные цветения кокколитофорид в Черном море

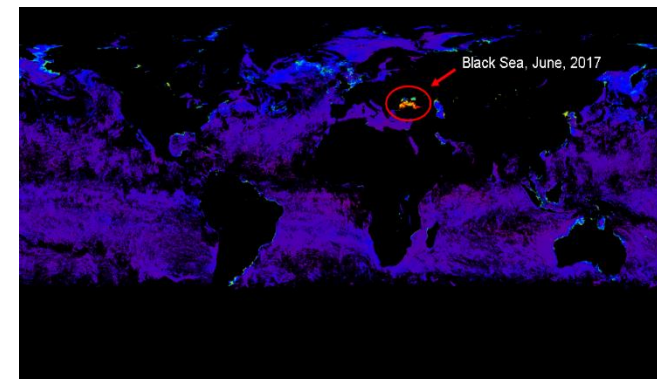
Кокколитофориды используют  $\text{CO}_2$  для образования известняковых ( $\text{CaCO}_3$ ) чешуек – кокколит, вызывающих сильное обратное рассеяние света. Оседание кокколит – основная причина “карбонового насоса”.



Кокколитофориды *E. huxleyi*



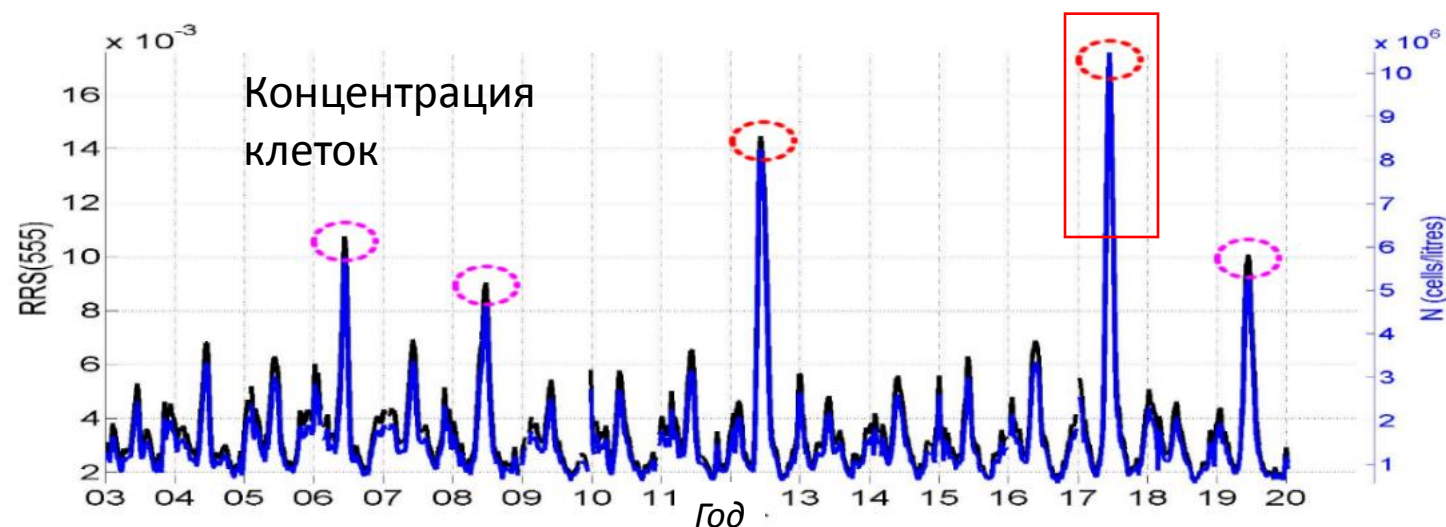
Черное море во время летнего цветения кокколитофорид



Спутниковая яркость MODIS в июне 2017 г.

В Черном море наблюдаются одни из сильнейших летних цветений кокколитофорид, а в последнее время фиксируются рекордные цветения (2012 г., 2017 г.) за спутниковую эру.

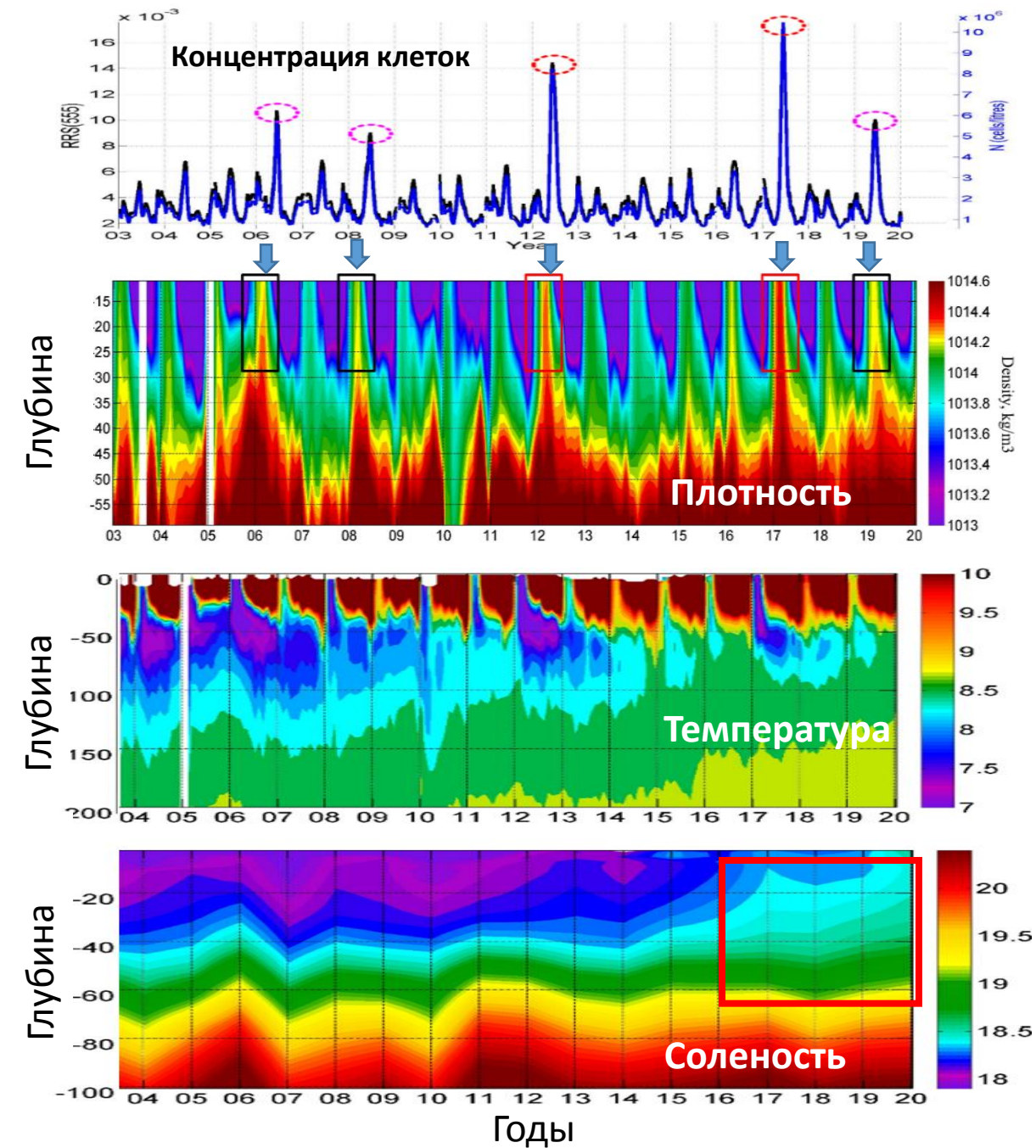
Цветение кокколитофорид имеют значительную межгодовую изменчивость, связанную с изменениями характеристик вертикального обмена.



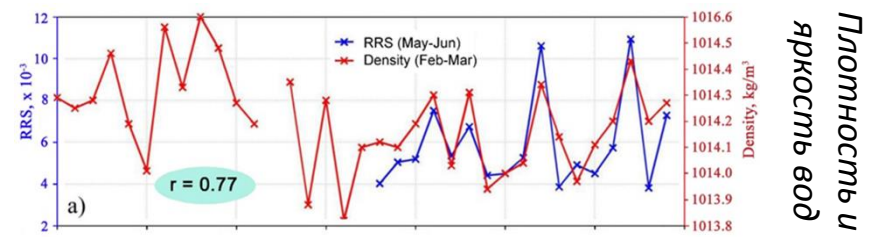
Межгодовые изменения спутниковой яркости в центре Черного моря



# Влияние солёности на изменение интенсивности конвективного вовлечения

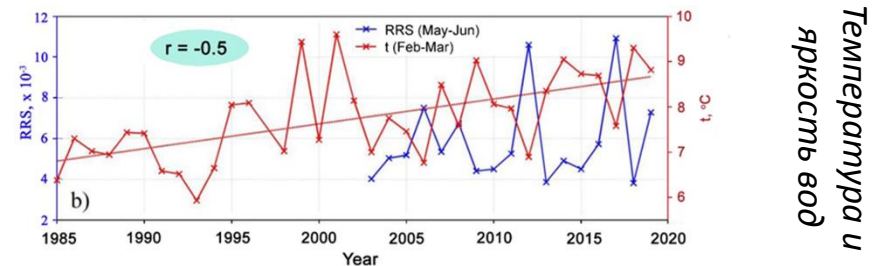


Биогенные элементы привязаны к изопикническим слоям, вовлечение из которых определяет их концентрацию и рост фитопланктона. Причина аномальных летних цветений кокколитофорид – выклинивание плотных вод в предыдущий зимний период в результате конвекции.



Плотность и  
вязкость вод

Глобальное потепление вызывает долговременный рост температуры – ослабление термической конвекции.



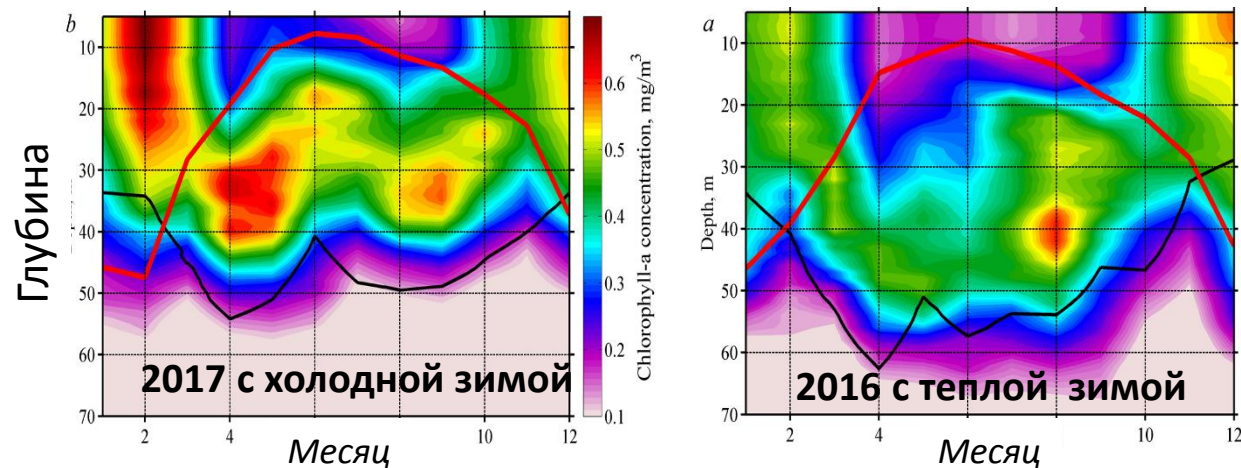
Температура и  
вязкость вод

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**

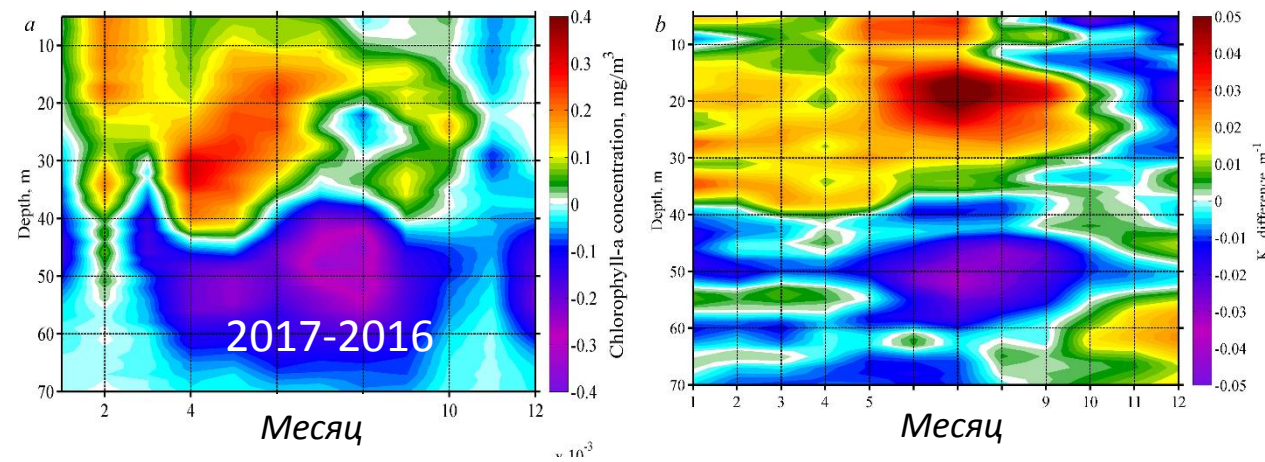


# Конвекция и эффект самозатенения

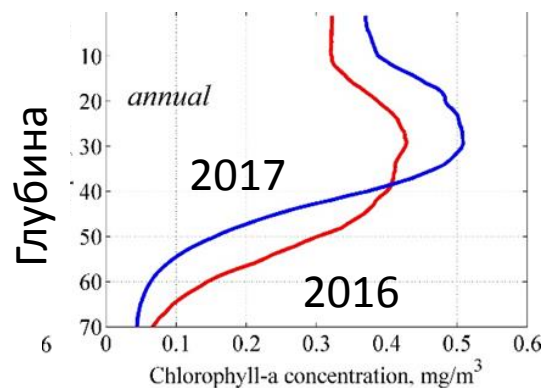
Конвективное вовлечение вызывает весеннее цветение фитопланктона и влияет на изменчивость Хл в течение всего года



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.



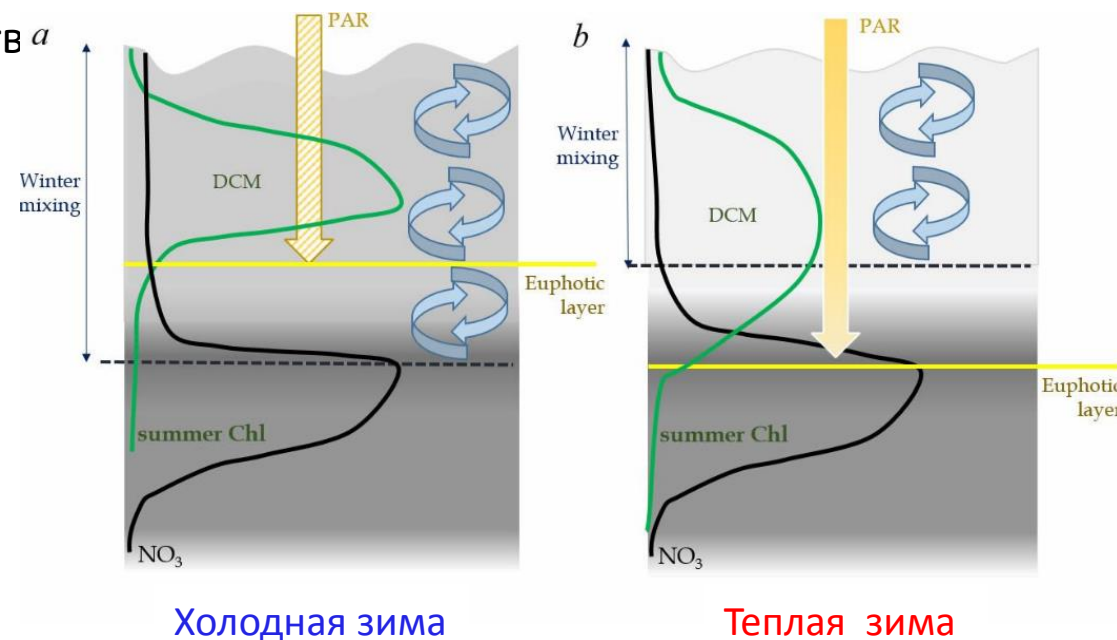
Среднегодовые профили концентрации Хл

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

Уменьшение потока биогенных веществ  $a$  в зимний период приводит к проникновению света в нижние слои с большей концентрацией биогенных элементов.

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

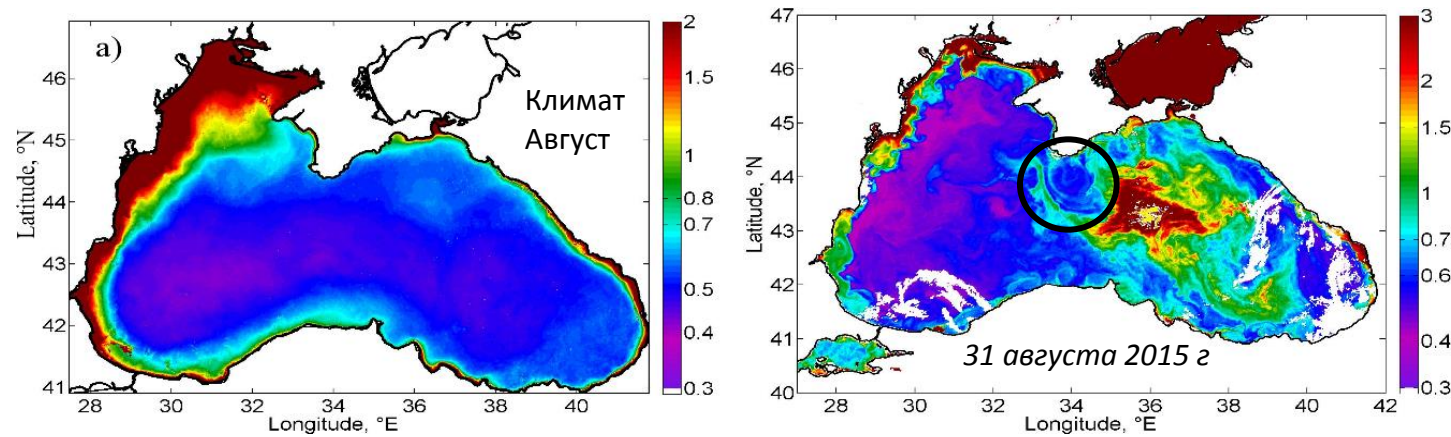
Интегралы Хл равны, а вертикальное распределение различно.



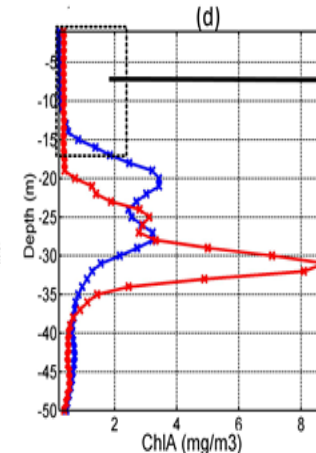


# Теплый период года - штормовое воздействие

Усиление штормового воздействия в последние годы приводит к возникновению аномальных цветений фитопланктона в теплый период года.



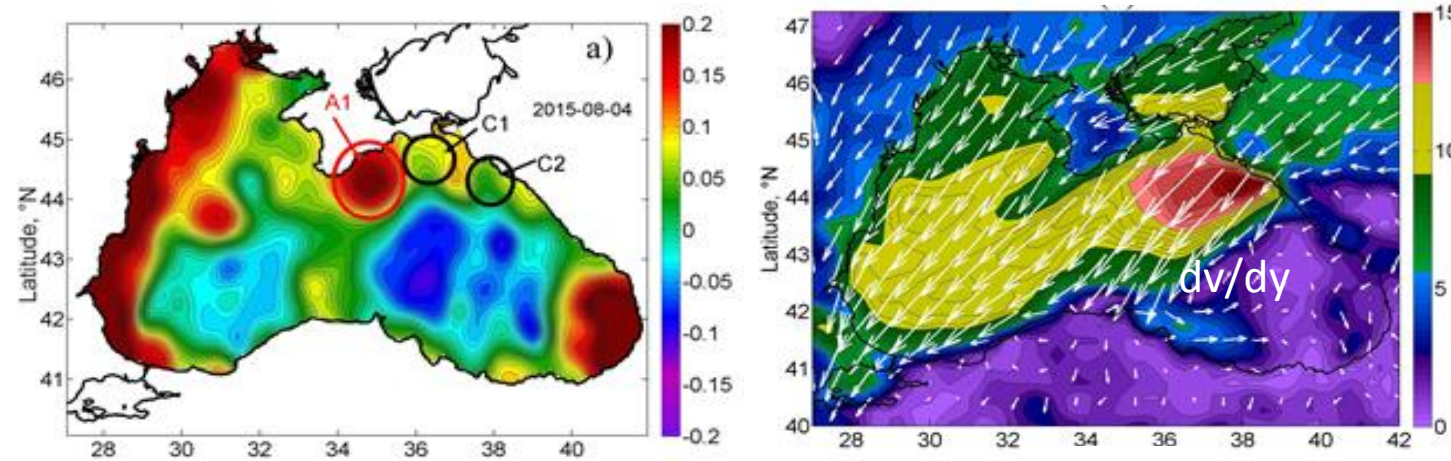
Климат Хл в августе (слева) и 31 августа 2015 г. (справа)



Профиль Хл  
до и после шторма

**Физические факторы, влияющие на развитие цветений:**

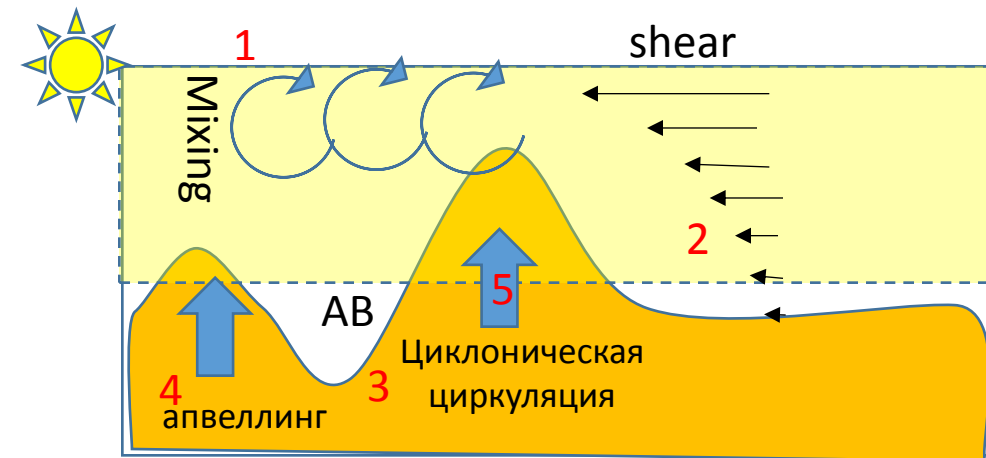
- ✓ ветровое турбулентное перемешивание;
- ✓ сдвиг инерционных течений;
- ✓ экмановский апвеллинг;
- ✓ динамическая топография – положение нутриклина;
- ✓ интегральное влияние завихренности ветра



Уровень моря

Скорость ветра

по данным спутниковой альтиметрии

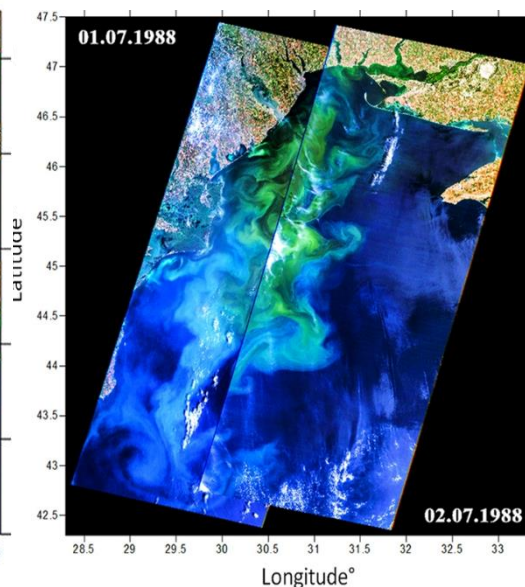
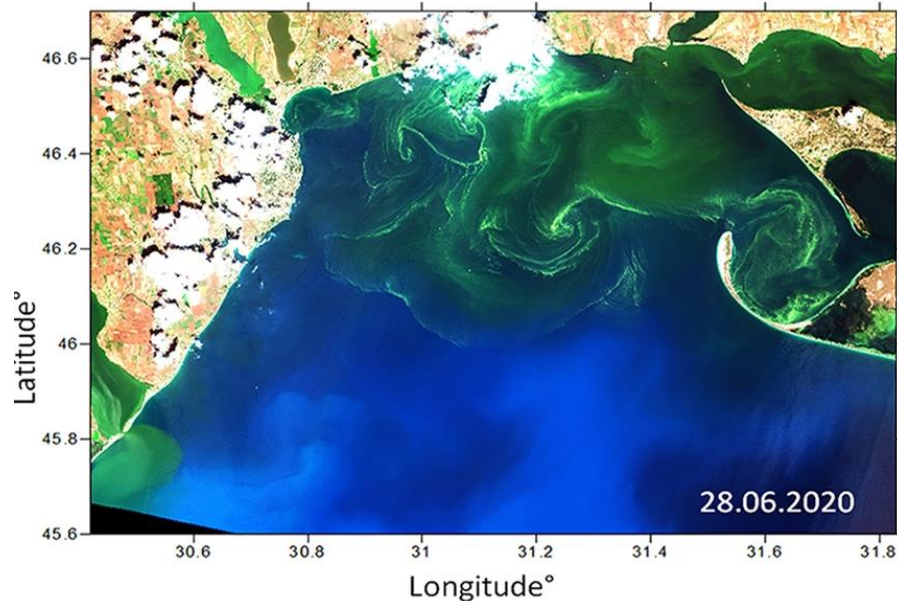
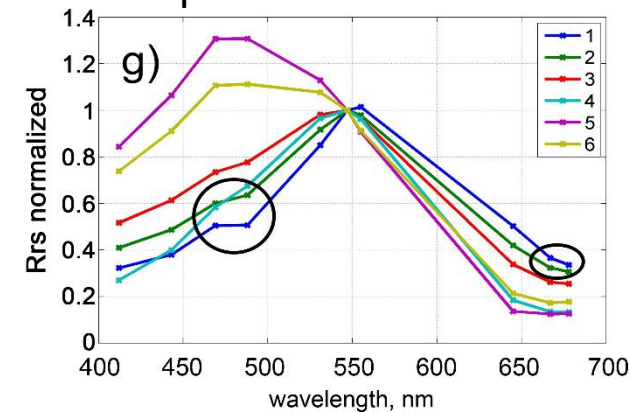


# Цветение цианобактерий и их межгодовая изменчивость

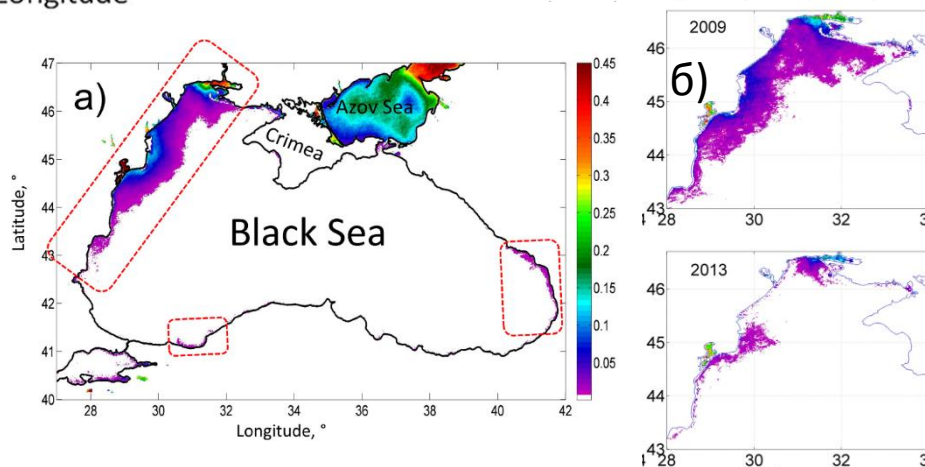
Цианобактерии – потенциально токсичные водоросли, способные вызывать резко негативное влияние на экосистему.

(Матишев, Фуштей, 2008; Вершинин и др., 2005)

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

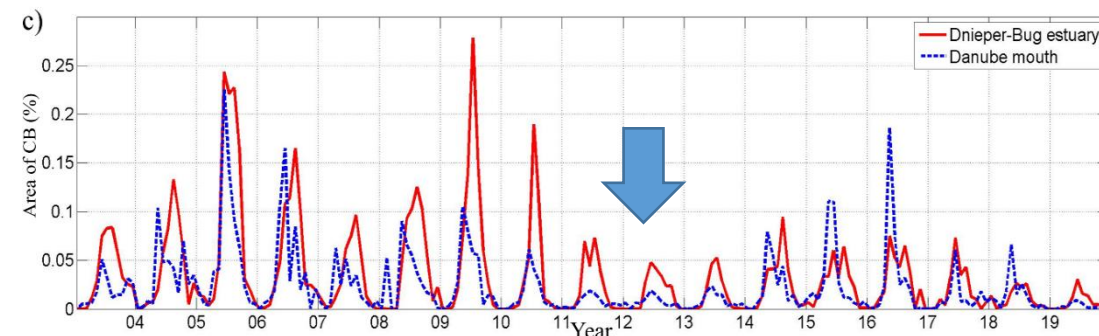


Районы наличия цианобактерий связаны с расположением источников пресных вод и значительно меняются от года к году



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**



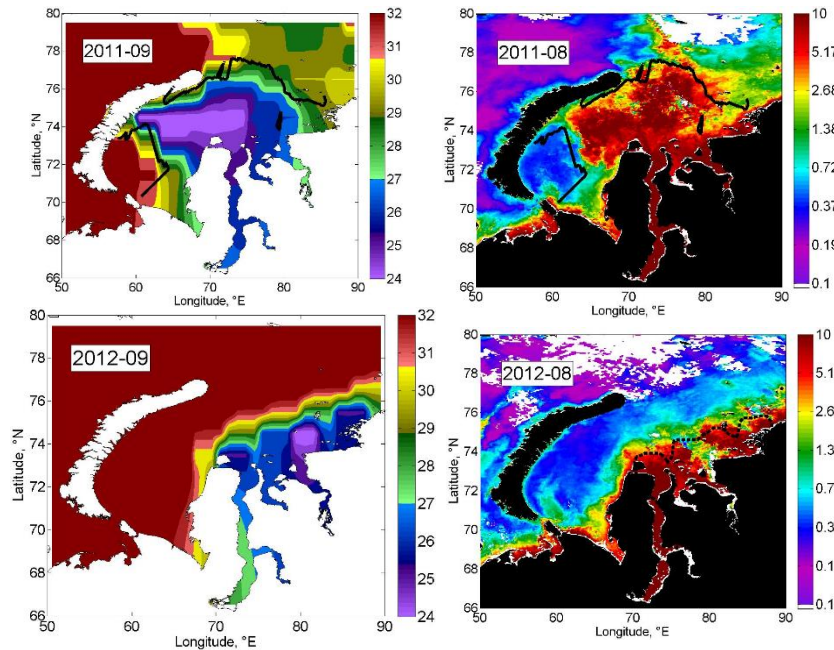
Временная изменчивость цветения цианобактерий в Черном море



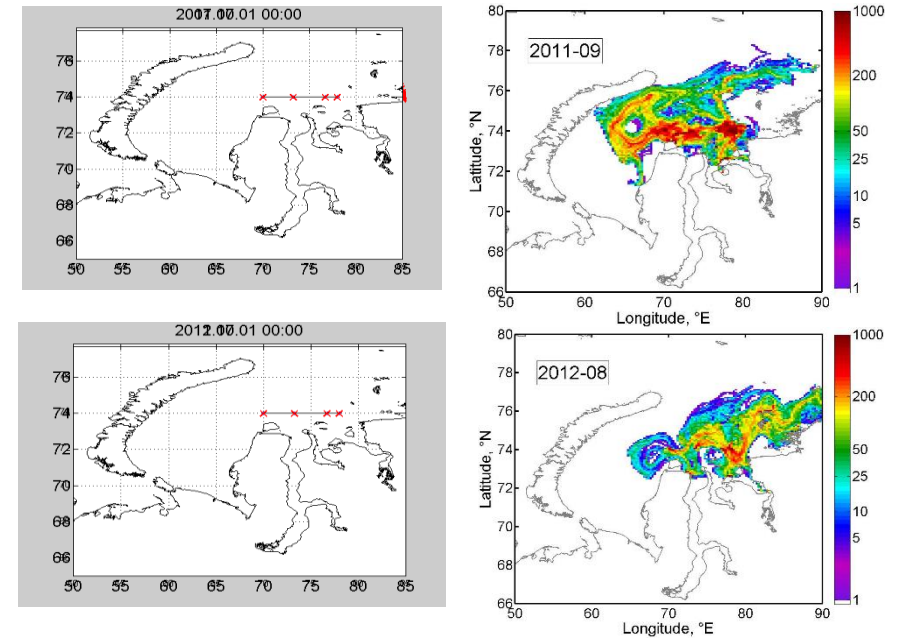
### 3. Горизонтальный обмен – распространение речных вод

Речные воды, втекающие в океан (плюм):

- ✓ Приносят большое количество биогенов (“+”)
- ✓ Уменьшают прозрачность вод (“-”)
- ✓ Изменяют халинные характеристики и увеличивают стратификацию вод



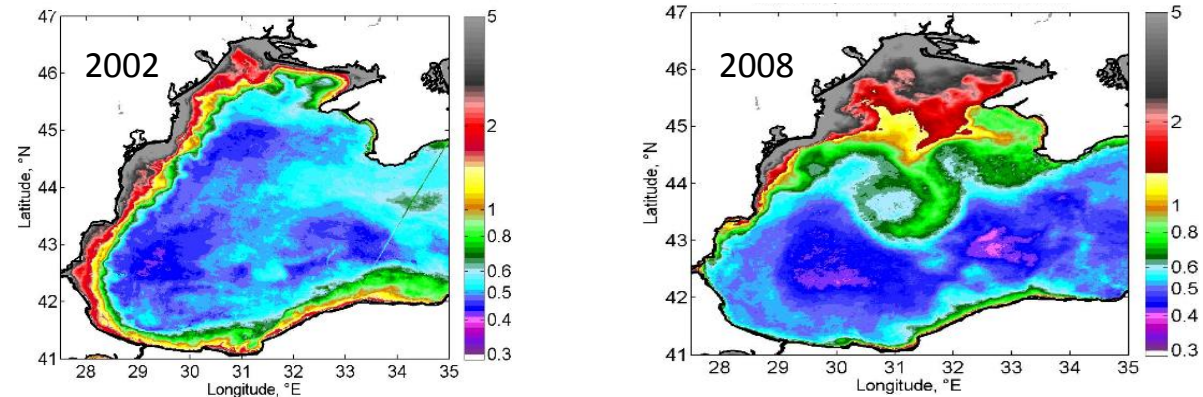
*Плюм в Карском море по спутниковым измерениям солености и концентрации Хл*



*Расчет движения плюма по данным спутниковой альтиметрии*

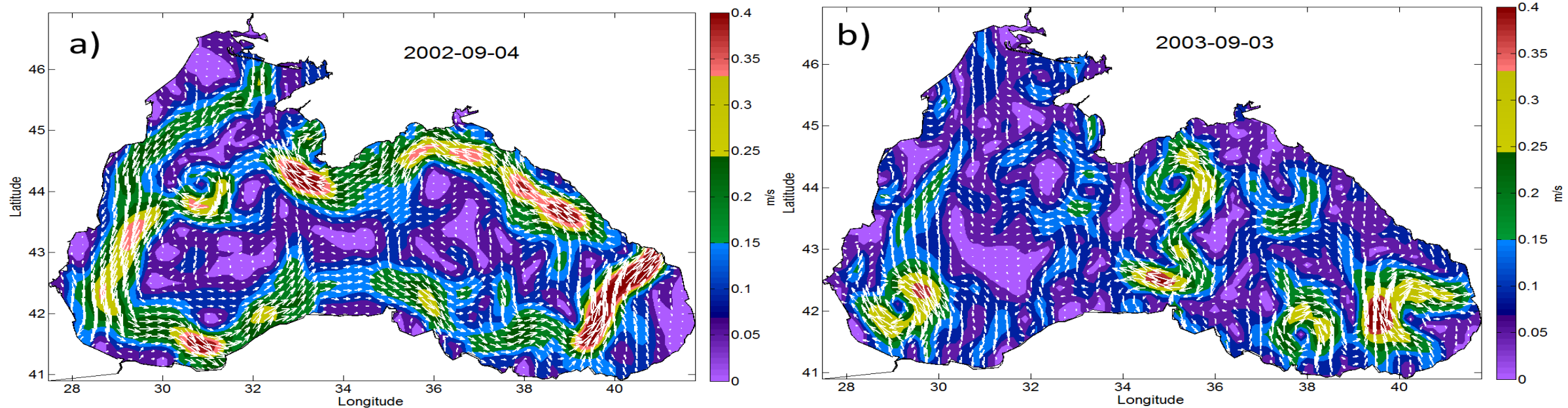
Направления переноса речных вод определяет региональные характеристики экосистемы и зависит от процессов горизонтального обмена: крупномасштабных течений, синоптических вихрей, дрейфового переноса и др.

Все эти процессы обладают значительной сезонной и межгодовой изменчивостью



*Блокировка речных вод у берега в 2002 г. и их интенсивный перенос в центр моря на среднелетних картах концентрации хлорофилла в Черном море*

# Изменение структуры океанических течений



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

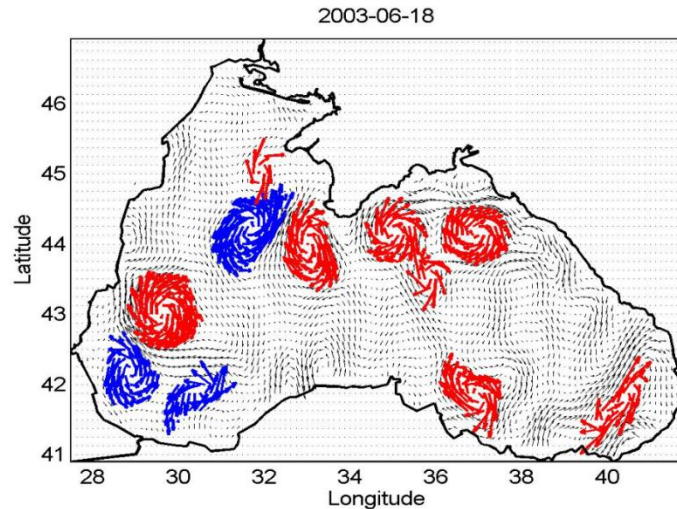
Два режима циркуляции Черного моря:  
“струйный” и “вихревой”



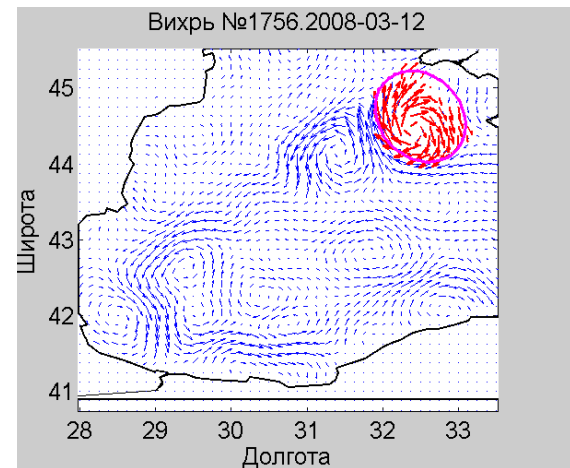
# Взаимосвязь крупномасштабной и вихревой динамики вод в Черном море

Кинетическая энергия геострофических течений Черного моря определяется атмосферным воздействием – изменчивостью завихренности поля ветра

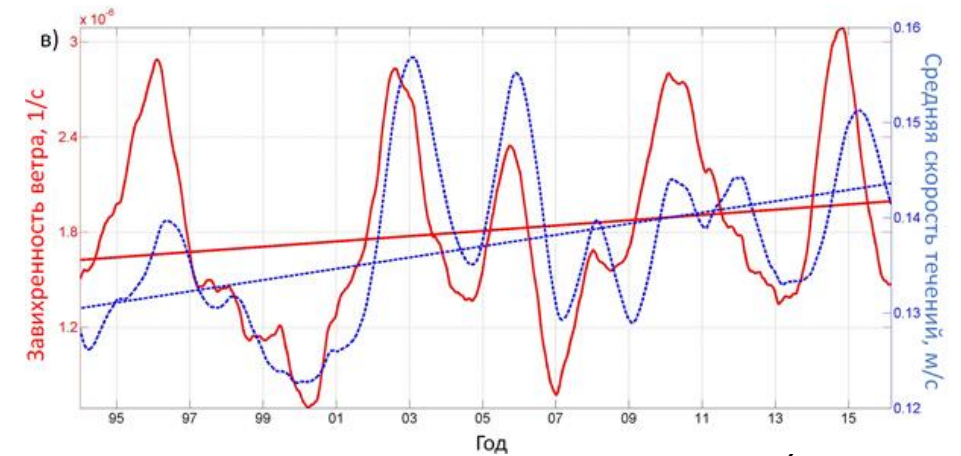
Для исследования вихревой динамики активно используются разработанные методы их автоматической идентификации, основанные на данных спутниковых альтиметров



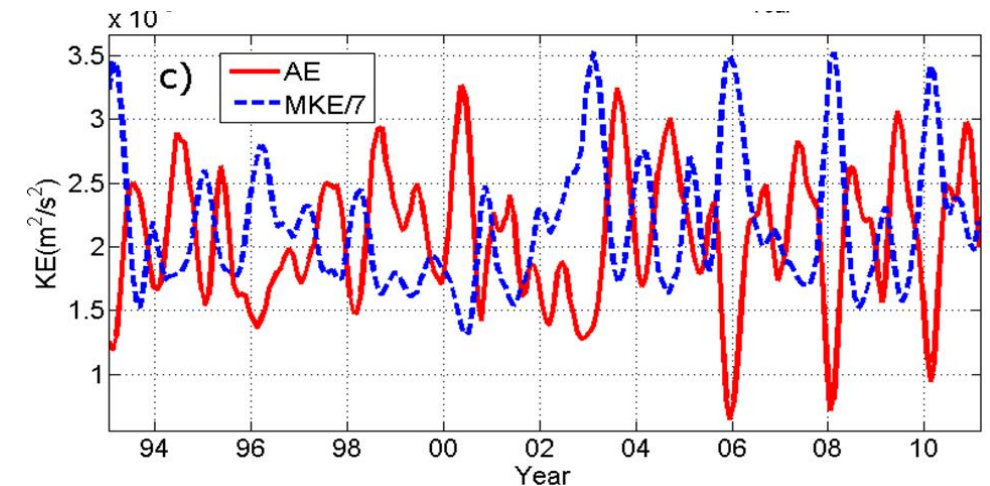
Пример карты идентифицированных вихрей и траектории вихря



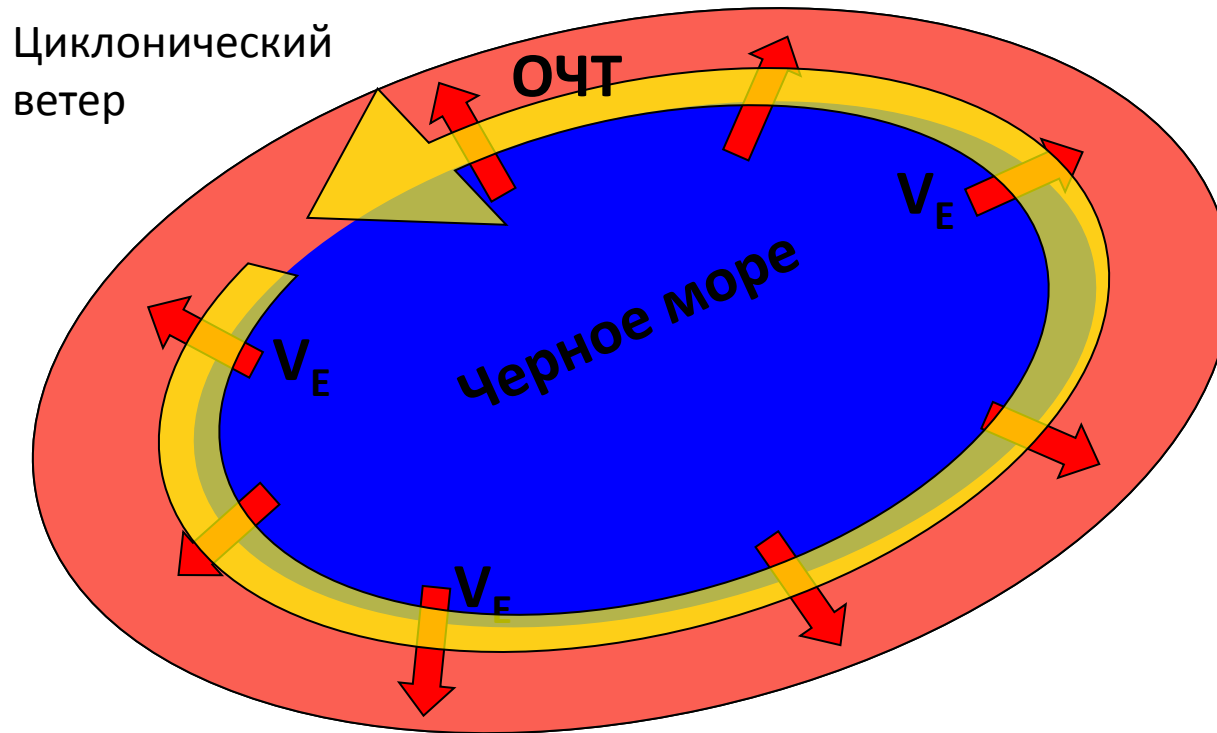
Интенсификация синоптических антициклонов наблюдается при ослаблении завихренности ветра крупномасштабной циркуляции



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



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

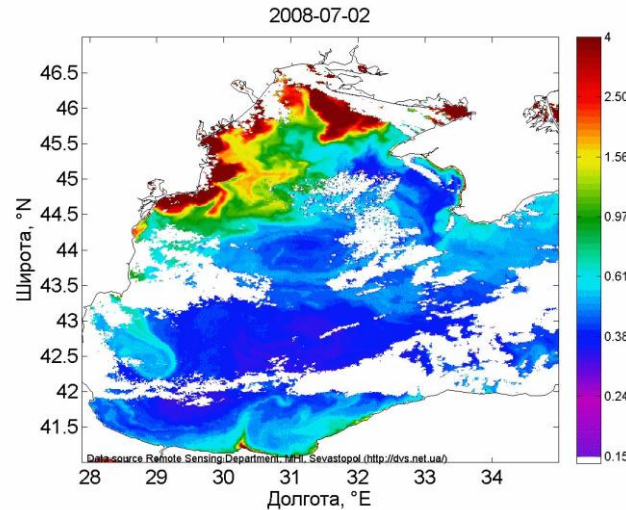
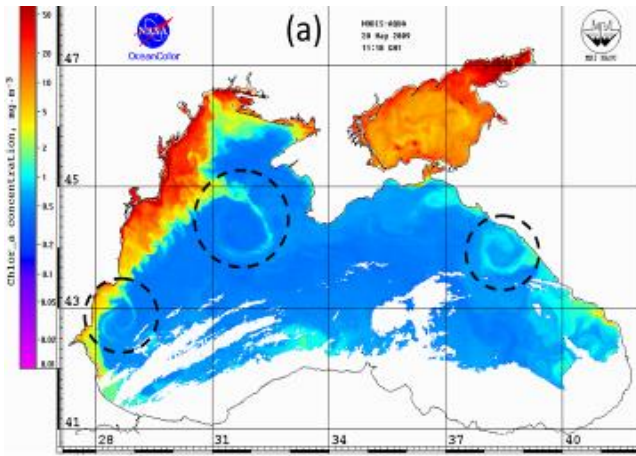


1) Усиление экмановской накачки вызывает интенсификацию циклонического ОЧТ

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



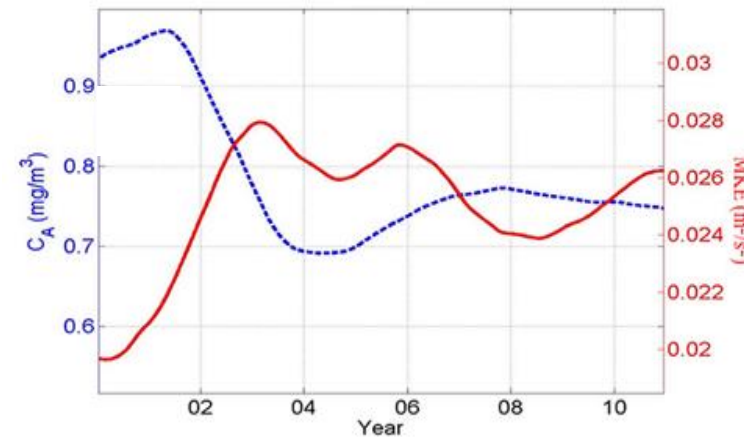
# Влияние динамики вод на межгодовую изменчивость концентрации хлорофилла А



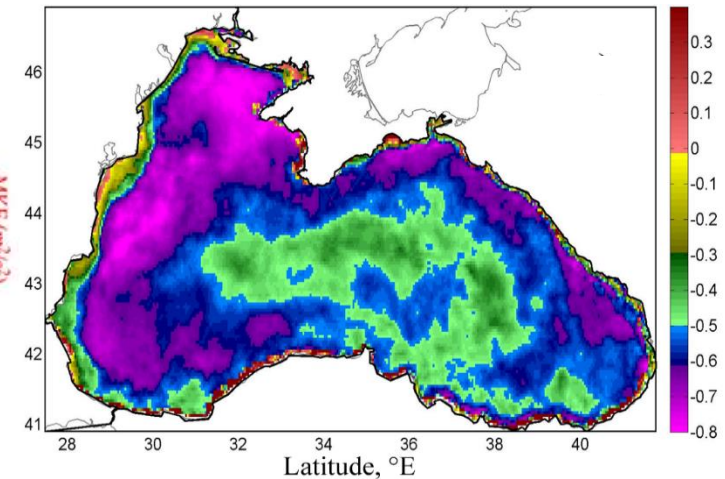
Поток шельфовых вод, вызванный одним антициклоном, в 2-3 раза превышает сток Дуная (*Shapiro et al., 2009*)

На межгодовых масштабах Хл и межгодовая энергия течений находятся в противофазе

Увеличение концентрации хлорофилла А происходит в периоды ослабления завихренности ветра, которое приводит к генерации вихрей и резкому смешиванию вод шельфовой и центральной частей моря



Изменчивость кинетической энергии течений (синяя линия) и Хл (красная) в центральной части моря



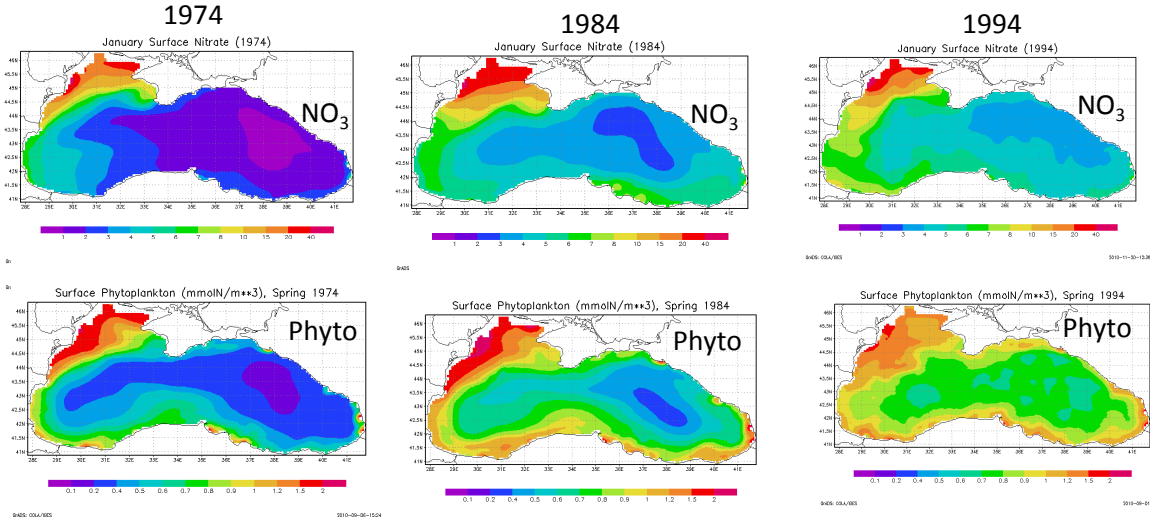
Карта корреляции между Хл и кинетической энергией течений (1-летнее сглаживание)

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

# Проблемы и перспективы

Настоящий доклад демонстрирует лишь часть физических процессов, оказывающих влияние на изменчивость биопродуктивности 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)*

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

Однако, качество моделирования ограничено большим количеством пробелов в описании ряда биохимических процессов – трансформации РОВ, механизмов фотоадаптации и многих других, связанных с ограниченностью имеющихся измерений

**Исследование этих процессов требует развития и внедрения автоматических методов определения биологических и химических характеристик морской среды, таких как**

- ✓ платформ для регулярных заякоренных измерений гидрофизических и биологических параметров
- ✓ методов экспресс-анализа химического состава;
- ✓ методов исследования трансформации органического вещества;
- ✓ методов автоматического определения таксономического состава фитопланктона и других...



# 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](mailto:arskubr@ya.ru)