

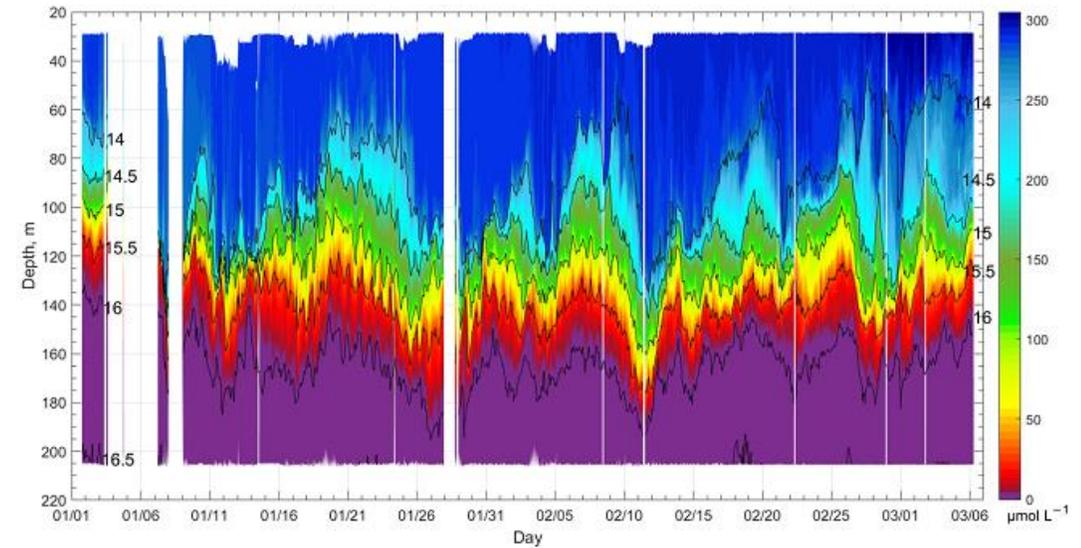
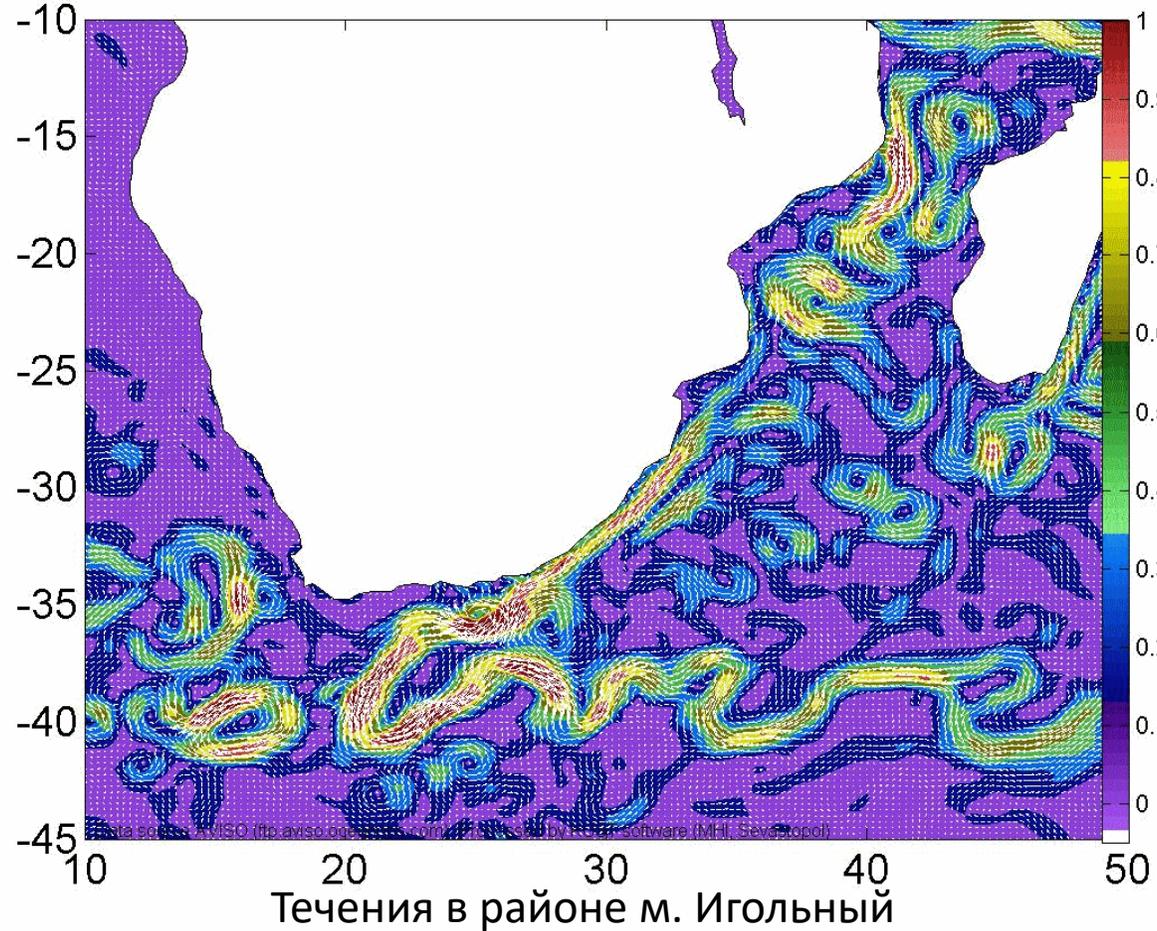
Динамика океана и её
влияние на морские
экосистемы по данным
дистанционного
зондирования

Кубряков А.А., Станичный С.В.
Морской Гидрофизический институт
г. Севастополь

Океан – уникальная оболочка Земли

1) Находится в постоянном движении **в отличие от суши**

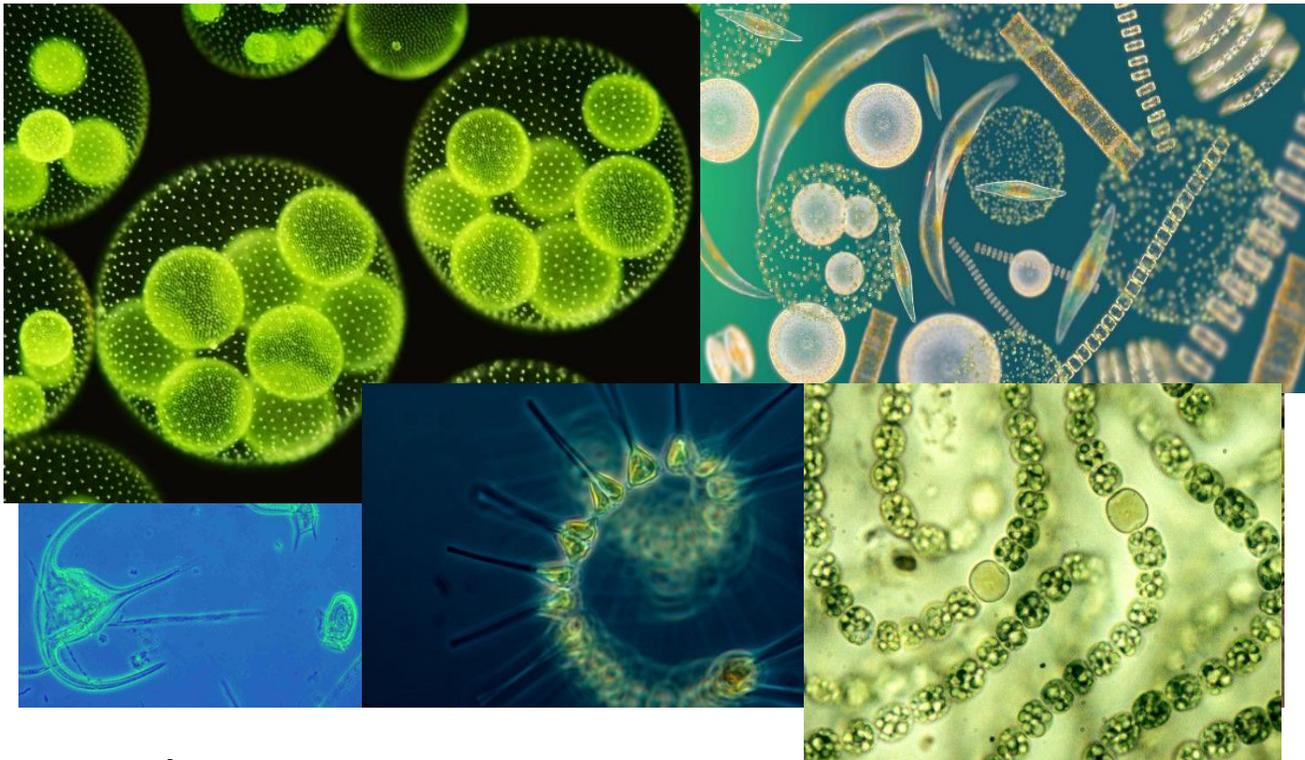
2009-12-30-00



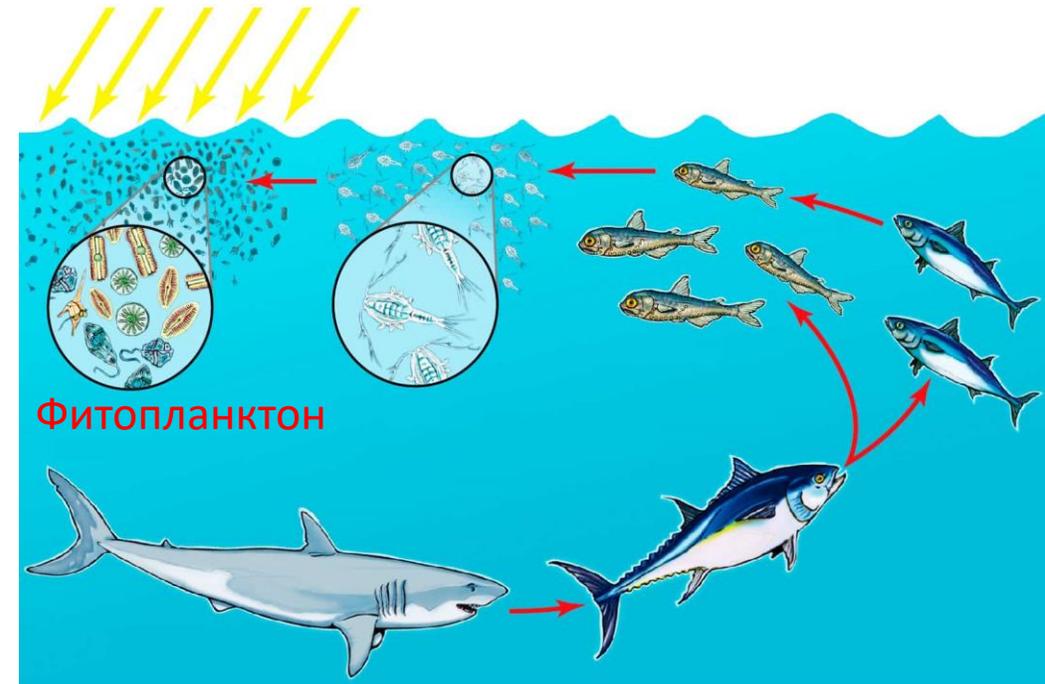
Изменчивость концентрации кислорода в Черном море по измерениям заякоренного профилера Аквалог

2) В океане есть жизнь, в отличии от атмосферы, базовым элементом которой является фитопланктон – микроводоросли

В процессе дыхания фитопланктон производит от 50 до 85% от общего количества кислорода на Земле – “легкие” планеты и поглощает почти половину атмосферного CO₂ за счет фотосинтеза (Field et al., 2008) – влияет на углеродный цикл

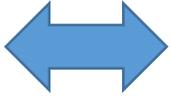


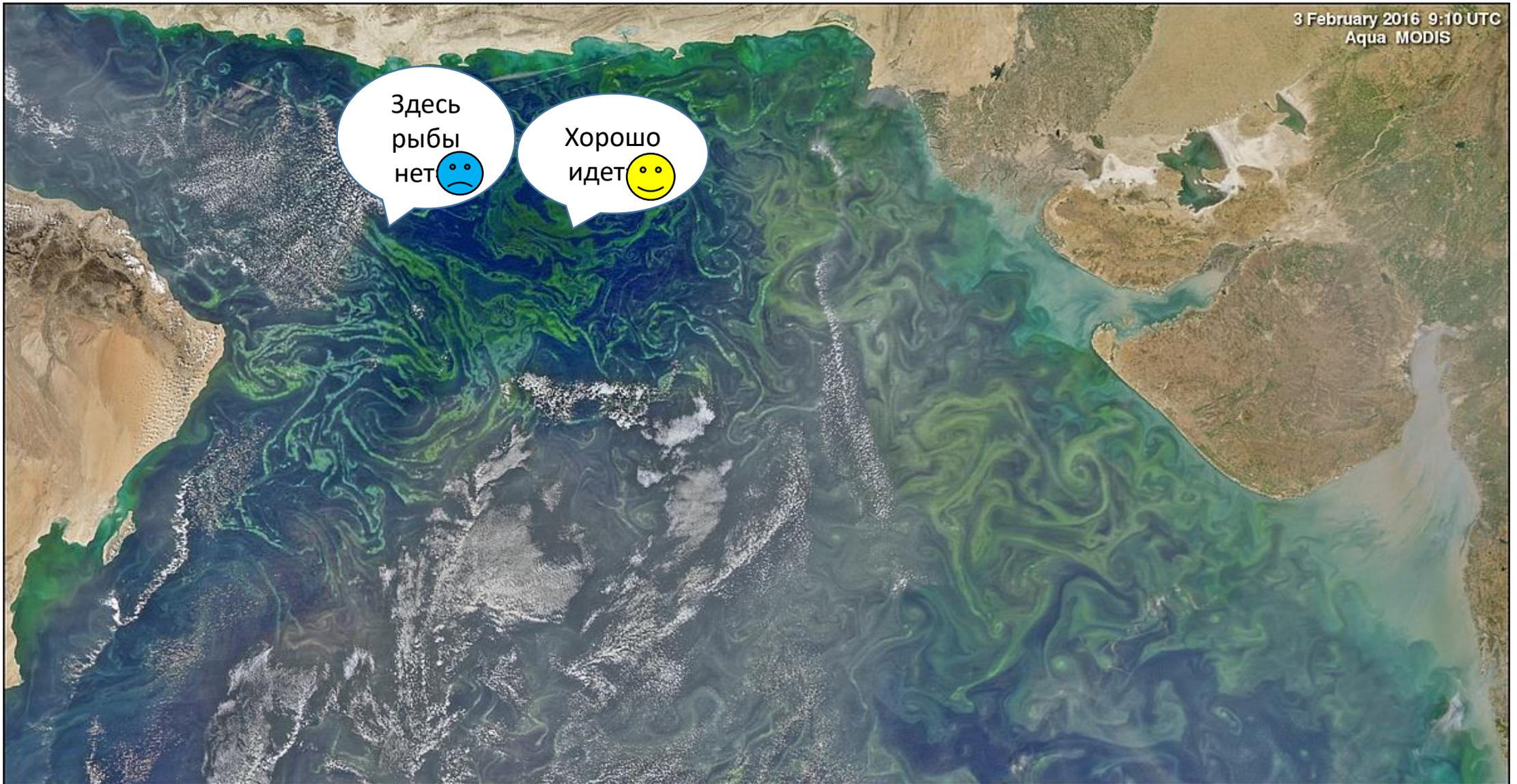
Фитопланктон



Трофическая цепь

Фитопланктон и нужные ему для развития питательные вещества (биогены) постоянно переносятся

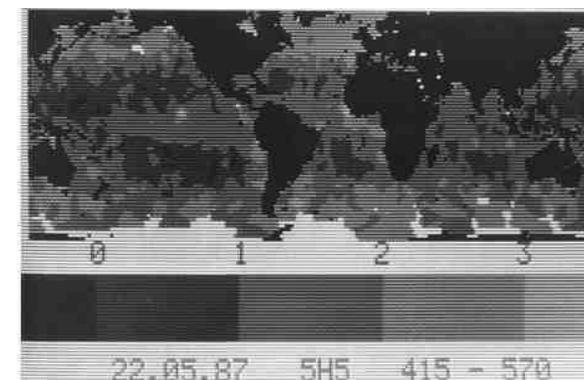
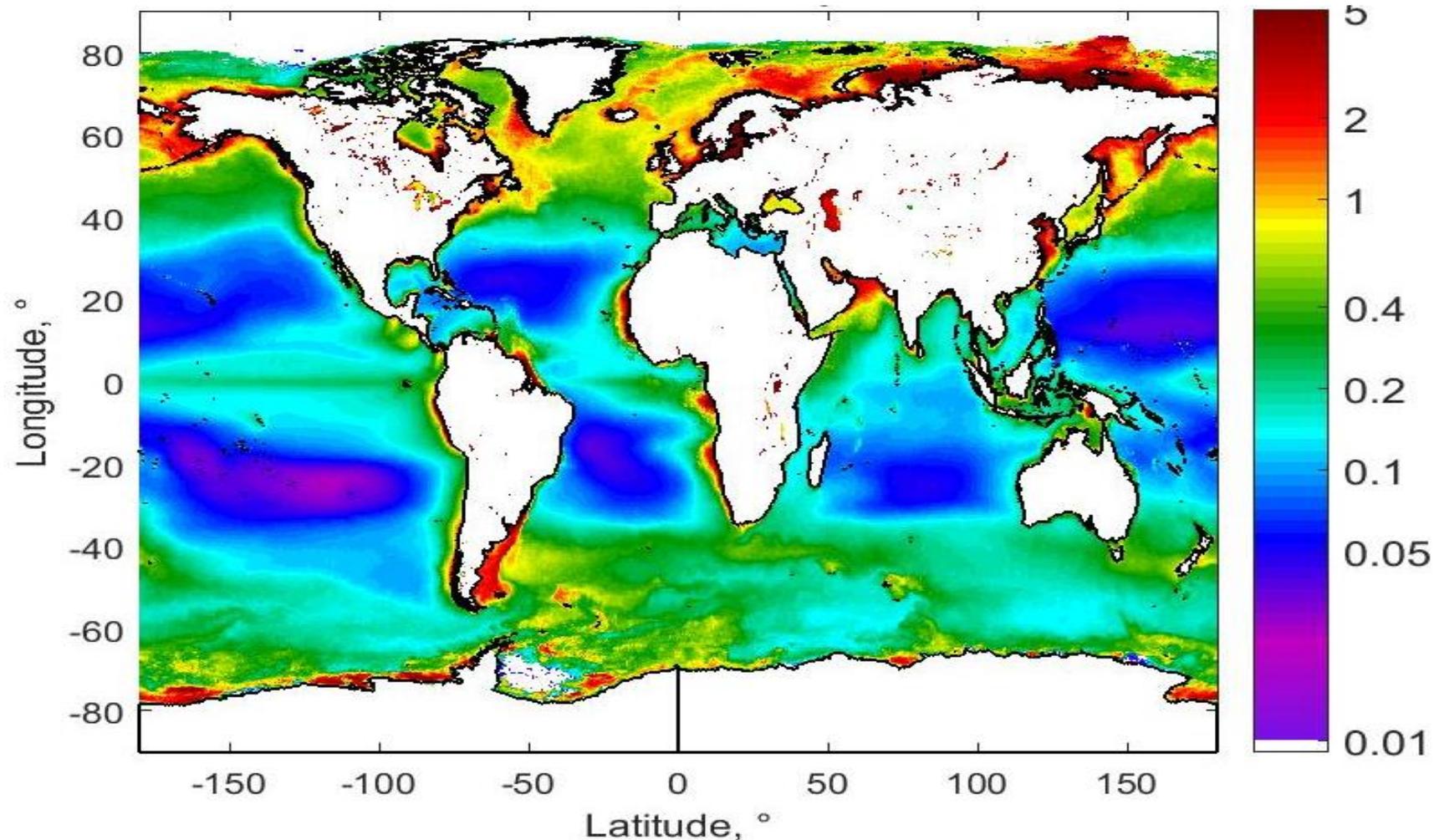
- по горизонтали (H)  - по вертикали (V) 



Спутниковые измерения цвета

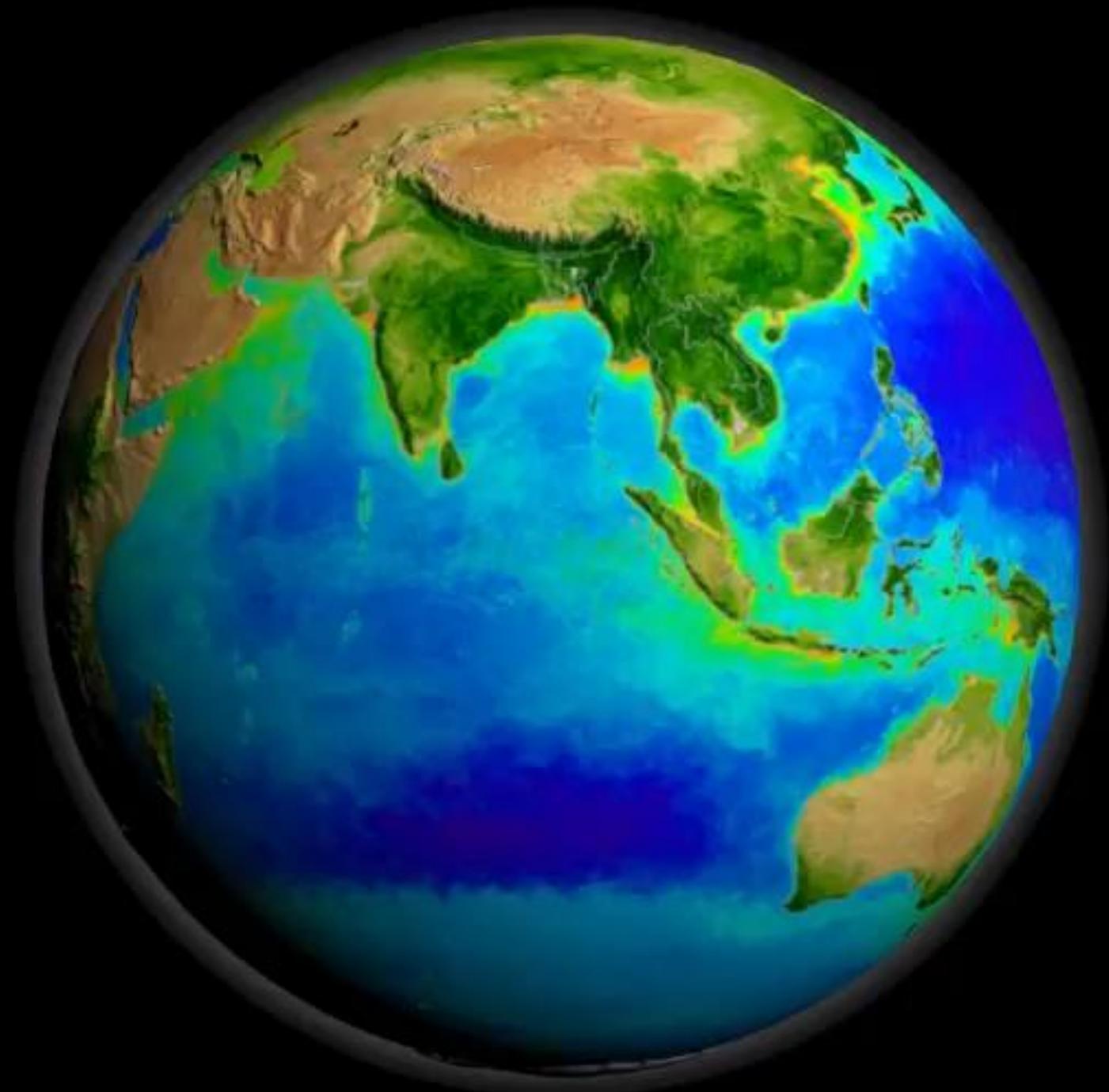
Фитопланктон содержит хлорофилл А – основной фотосинтезирующий пигмент зеленого цвета, что позволяет наблюдать его со спутников

Спутниковые измерения - основа информации о глобальных процессах в морской экосистеме



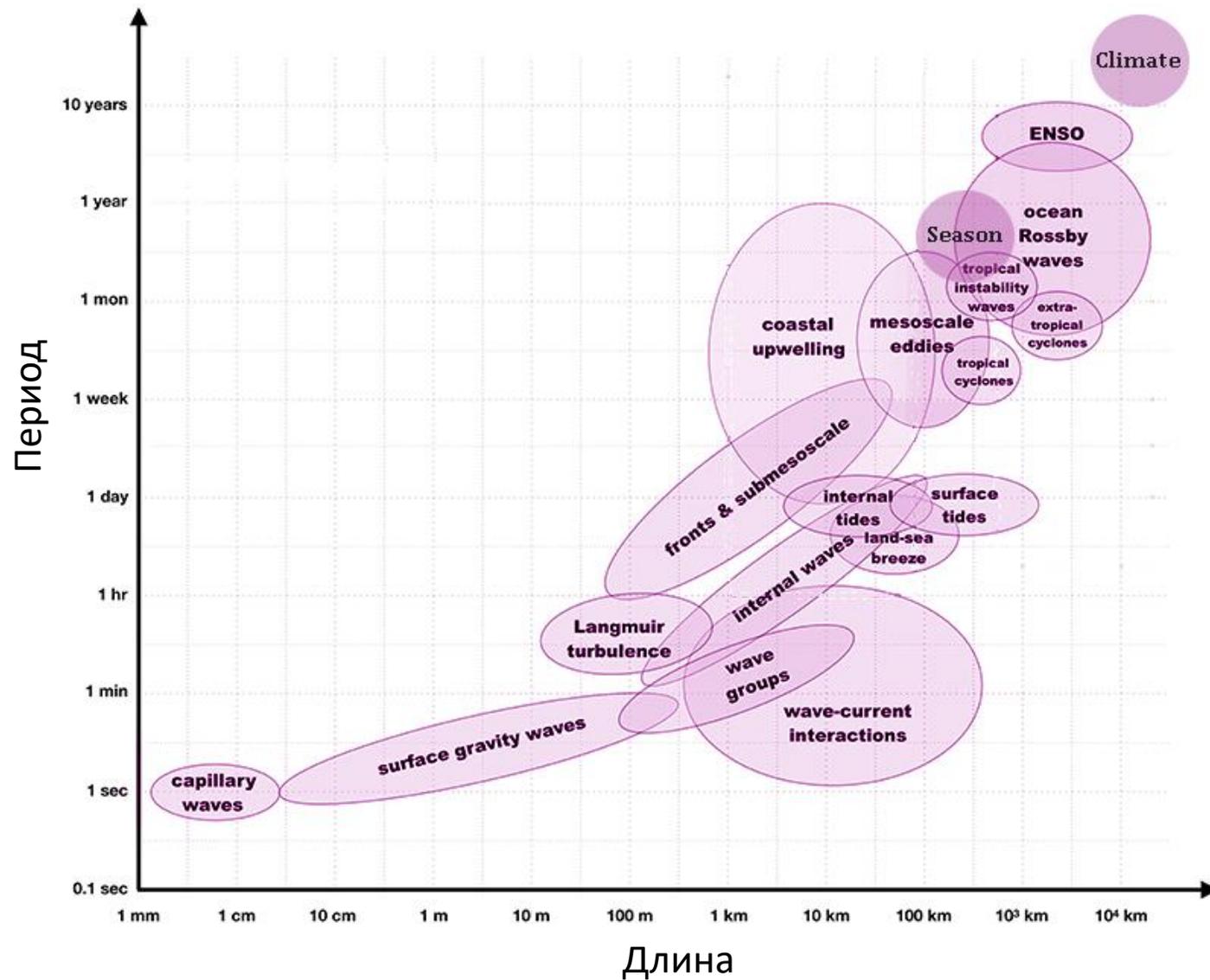
Первая в мире карта "цвета" Мирового океана была создана в СССР в Морском Гидрофизическом Институте, г. Севастополь по данным советского спутника InterKosmos-21

Глобальное распределение концентрации хлорофилла на поверхности океан по данным спутника MODIS



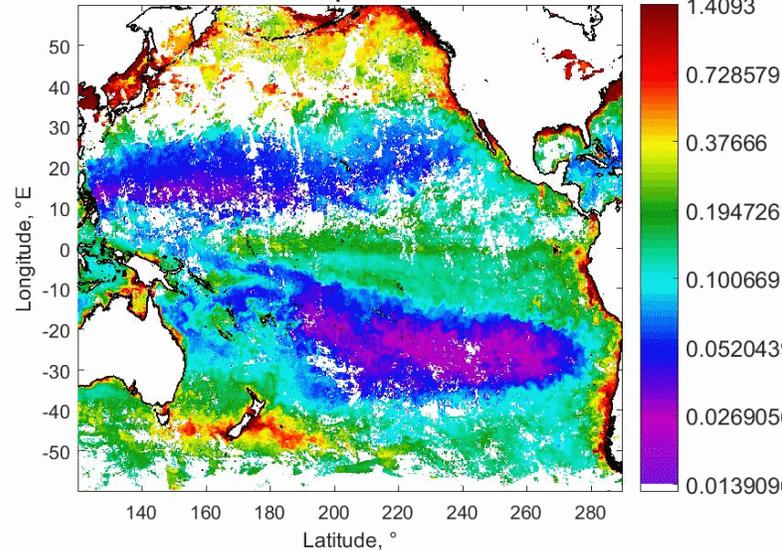
Sep 1997

1. Крупномасштабные круговороты
2. Струйные течения
3. Планетарные волны
4. Синоптические вихри
5. Апвеллинги
6. Субмезомасштабные течения
7. Фронты
8. Внутренние волны
9. Турбулентность...



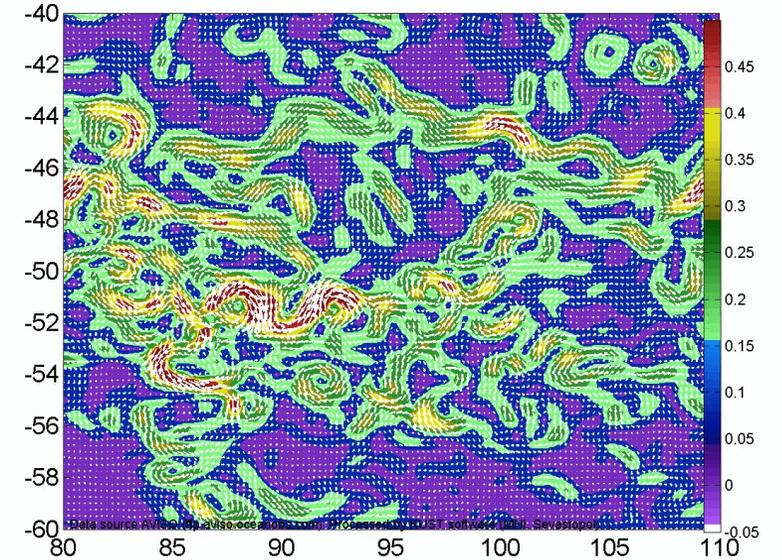
www.gif-animators.com - UNREGISTERED

CHL chlor a Aqua 8D 2010-04-11



Размеры экваториальных волн превышают 10000 км

2004-01-07-00

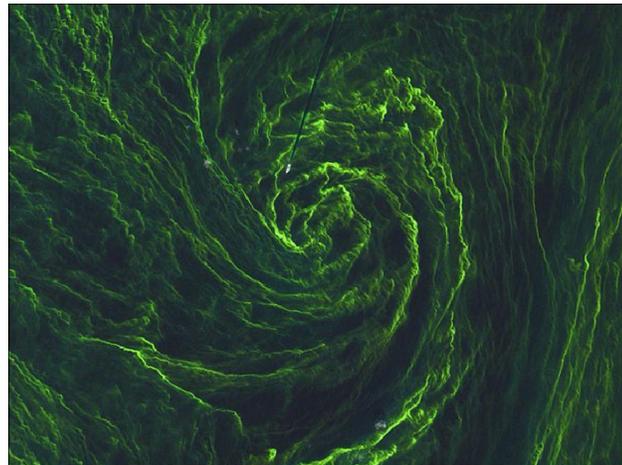


Течения в Южном океане

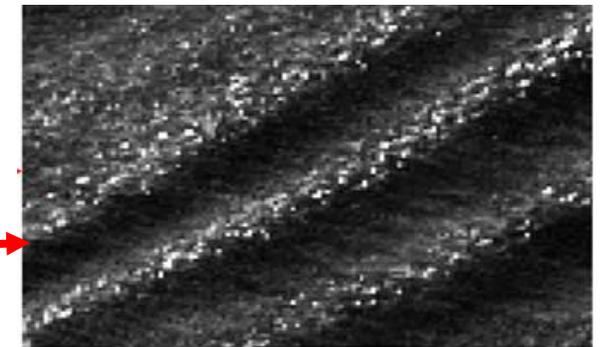
Спутниковые измерения:

- Альтиметры
- Оптические и ИК радиометры
- РСА

позволяют изучать процессы в океане с масштабами от нескольких метров до тысяч километров



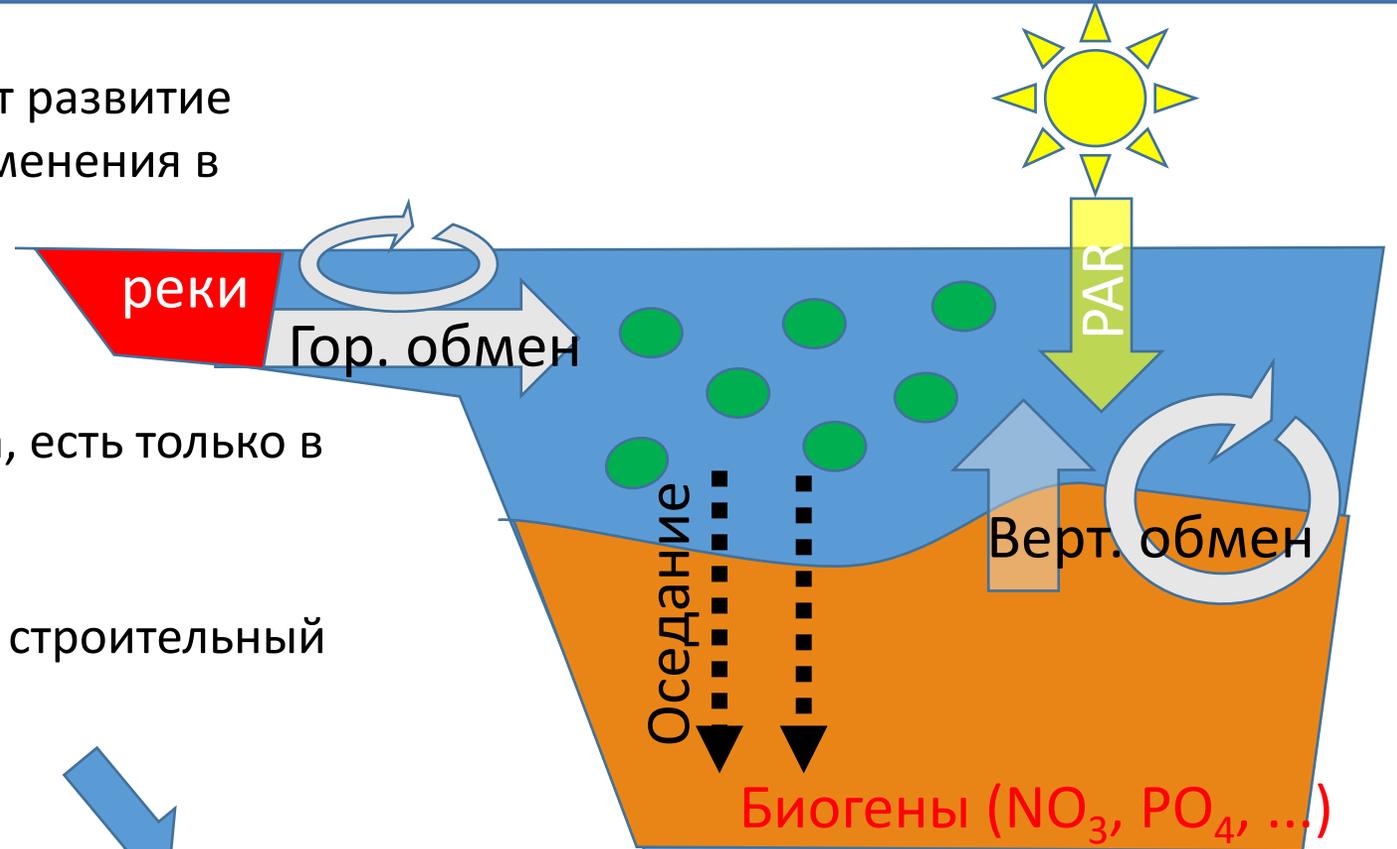
Вихрь в Балтийском море увлекает водоросли в круговое движение



Внутренние волны в проливе Гибралтар и их влияние на пенные обрушения - барашки

Изменчивость физических условий определяет развитие фитопланктона и во-многом контролируют изменения в функционировании морских экосистем

- 1) **Свет** – необходим для фотосинтеза, есть только в верхнем слое океана
- 2) **Питательные вещества (биогены)** – строительный материал для клеток.



Горизонтальный обмен биогенами

Перенос биогенов из мест, где их много (например от устьев рек), туда, где их мало (открытые части океанов)

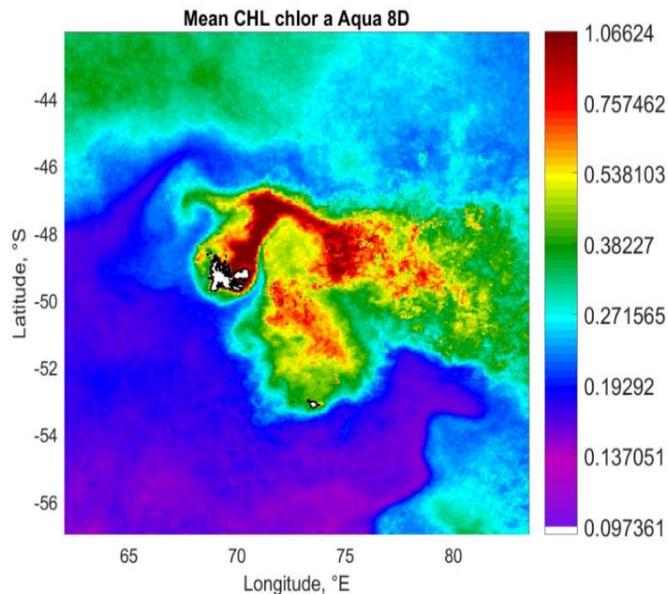
Вертикальный обмен (адвекция + турбулентность)

Биогены скапливаются в нижних слоях океана, откуда могут попадать в верхний освещенный слой под влиянием вертикального обмена

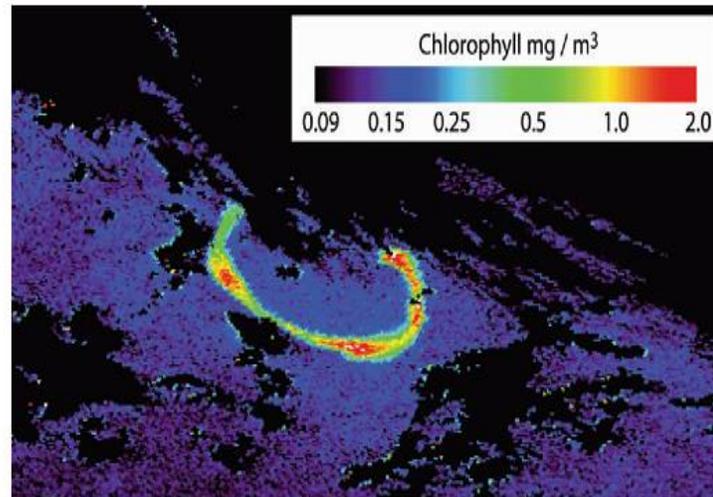
1. Горизонтальный обмен

Из-за отсутствия суши в Южном океане фитопланктону крайне не хватает железа, которое имеет терригенную природу

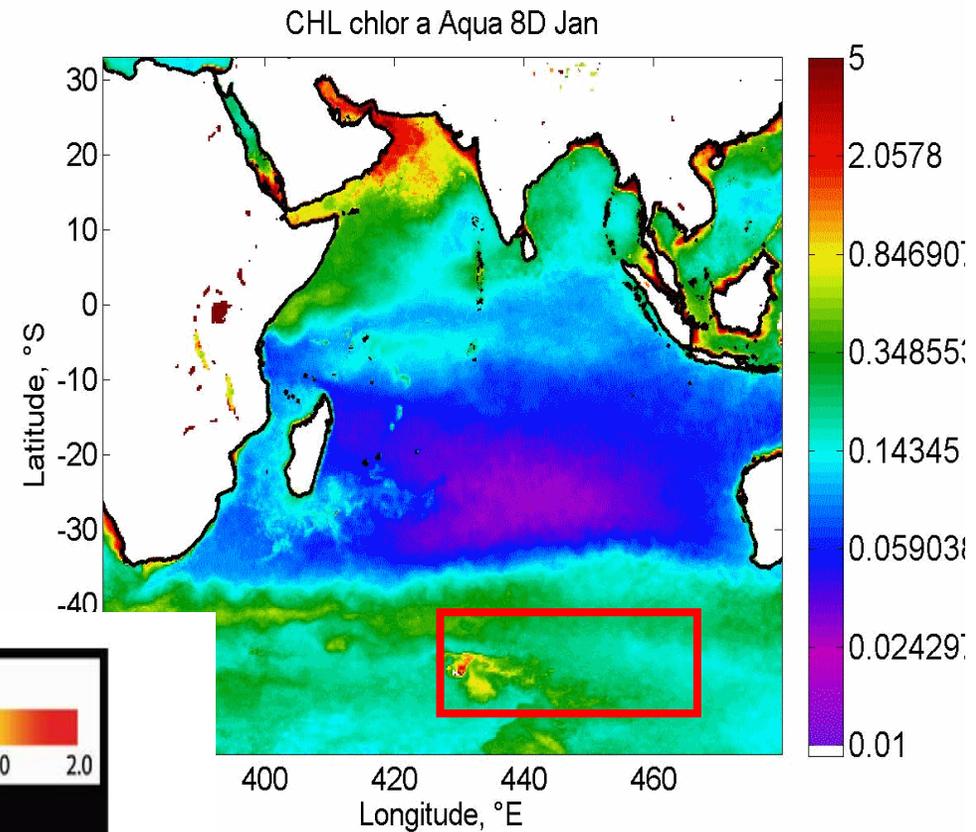
Мощнейшие цветения вспыхивают у мелких островов, которые поставляют железо, что приводит к росту Хл в десятки раз и появлению языка **продуктивных вод длиной до 3000 км**



Цветение у Кергеленских островов



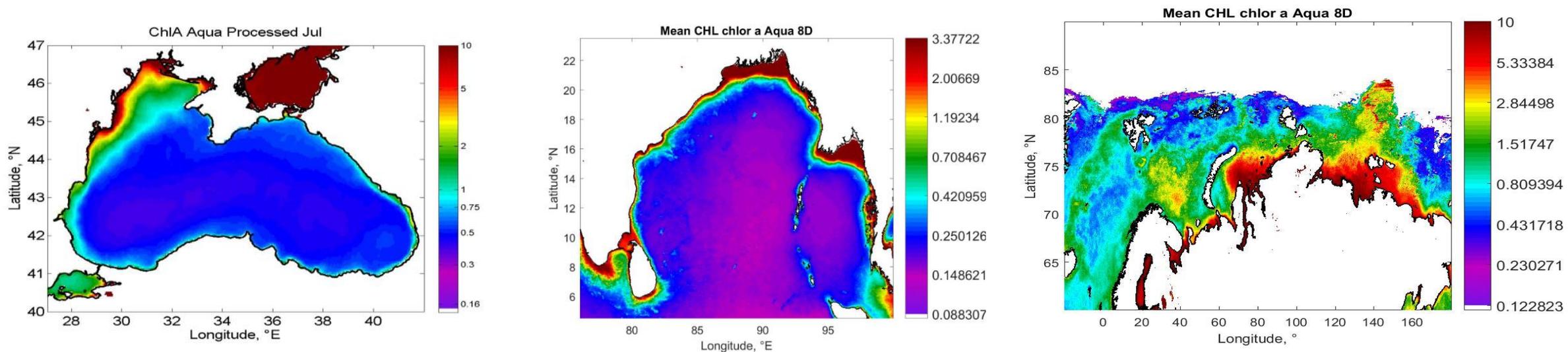
Цветение фитопланктона в Южном океане при незначительной добавке железа в воду



Концентрация Хл в Южной части Индийского океана

Высокая продуктивность в береговой зоне

Наибольшая продуктивность и концентрации хлорофилла обычно наблюдаются в береговой зоне, там, где в море с суши попадают различные минеральные вещества



Пример: Высокие концентрации хлорофилла в Бенгальском заливе, Черном море и Арктике сосредоточены в береговой зоне

Особенно интенсивное поступление органических и неорганических соединений – биогенов наблюдается в местах впадения рек, где наблюдаются максимальные концентрации хлорофилла

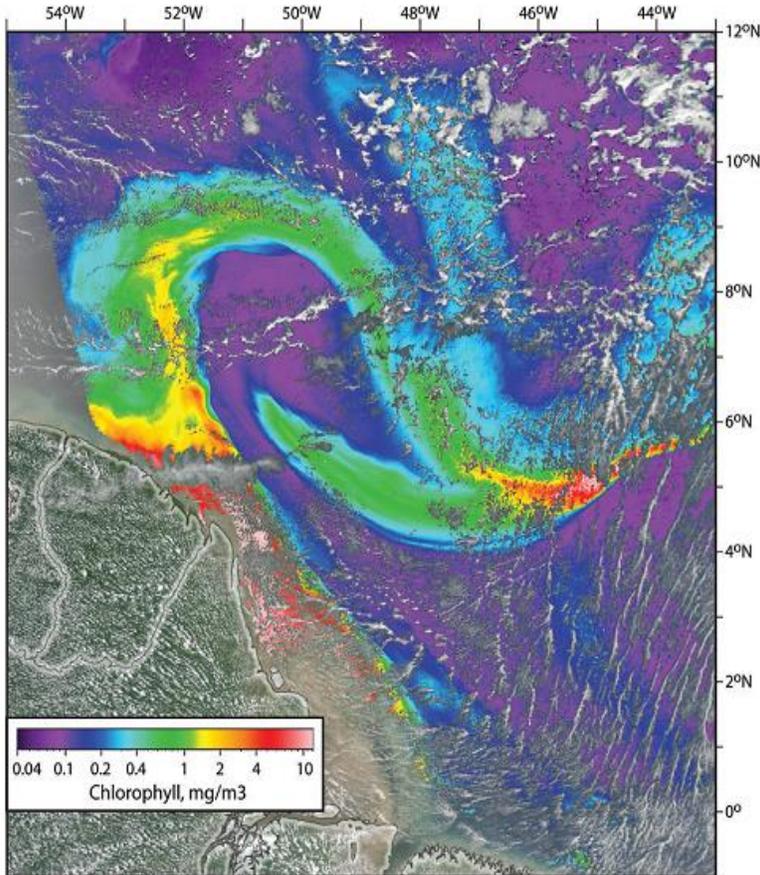


Figure 5.15. Chlorophyll map of west Equatorial Atlantic Ocean derived from Aqua MODIS on September 30, 2006 showing the track of nutrient-rich water from the River Amazon.

Р. Амазонка



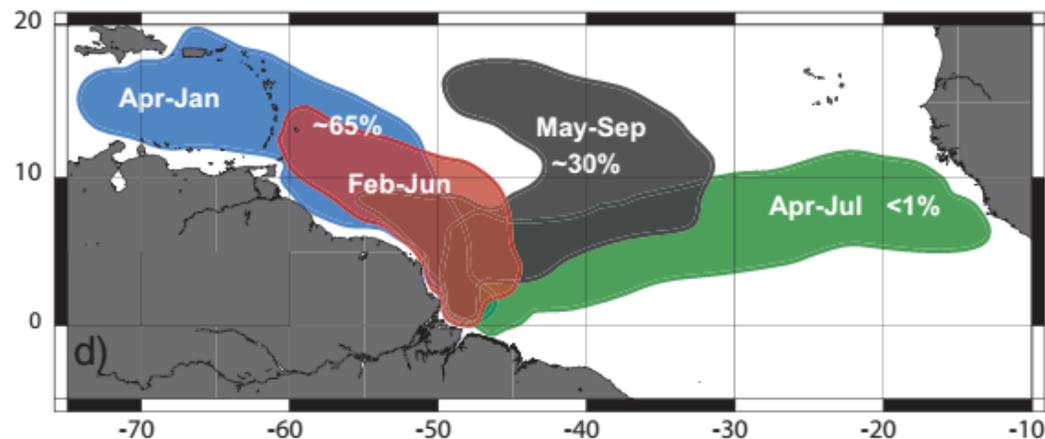
Р. Ориноко



Р. Гвадалахара

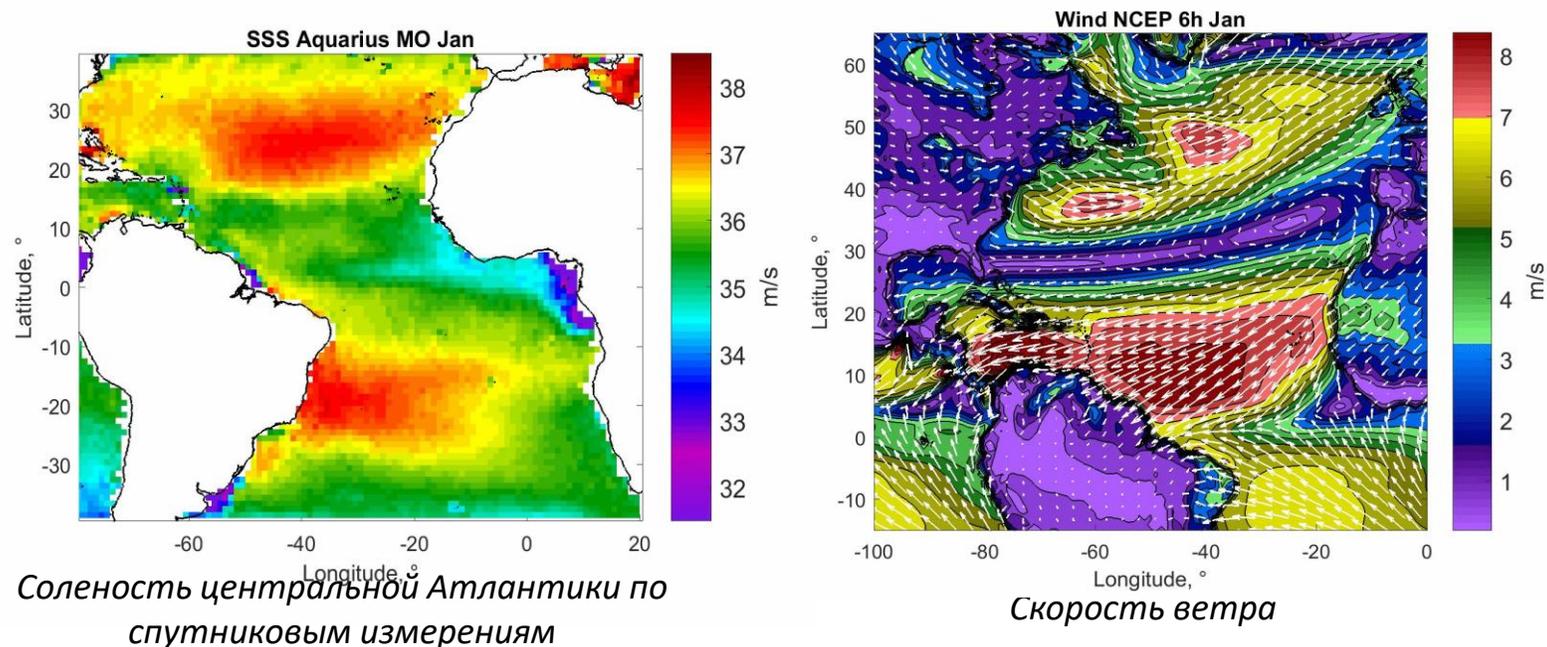
Распространение плуа реки Амазонка

Направления переноса речных вод определяет региональные характеристики морских экосистем и зависит от многих факторов: изменений ветра, течений, вихрей, плотностной структуры



Распространение вод Амазонки в разные месяцы (Coles et al., 2011)

Все эти процессы обладают значительной сезонной и межгодовой изменчивостью

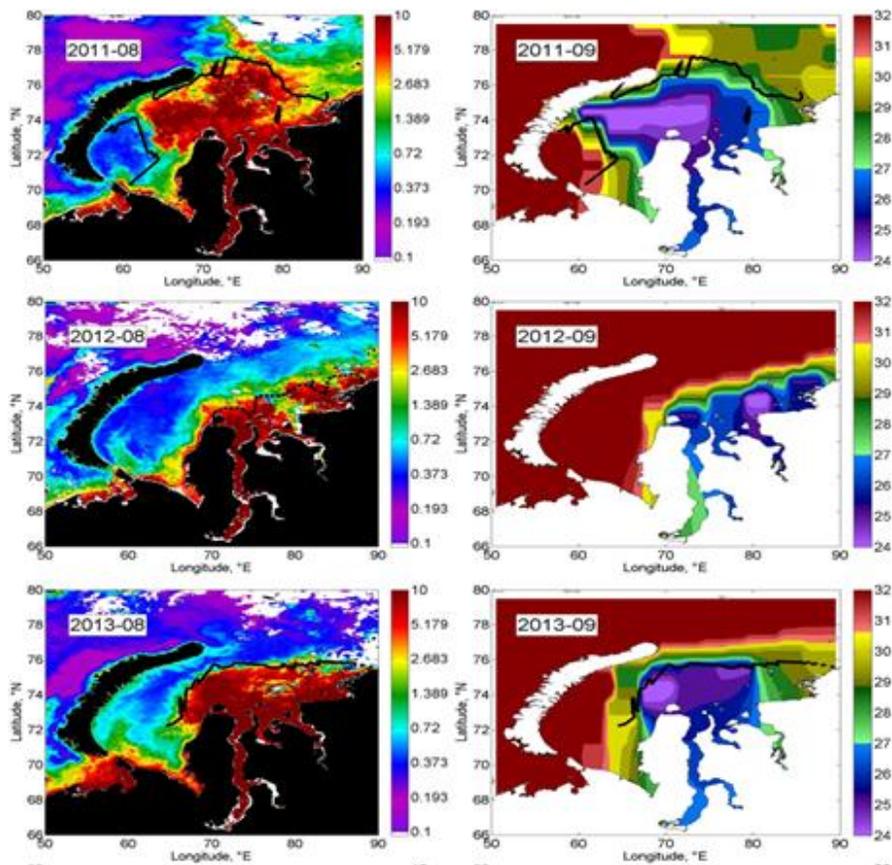


Соленость центральной Атлантики по спутниковым измерениям

Скорость ветра

хлорофилл

соленость

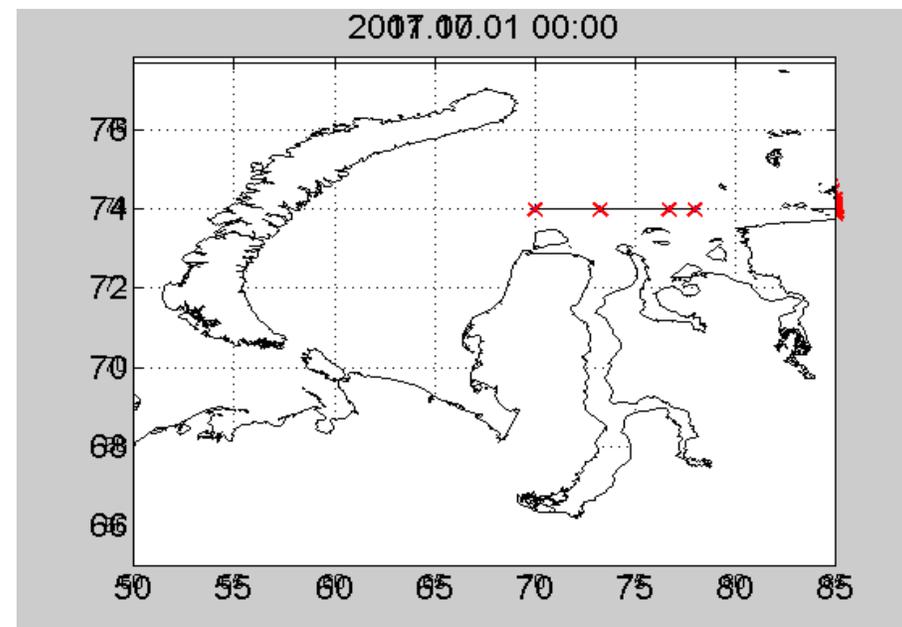


Межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла А и солёности вод Карского моря по спутниковым данным (Kubryakov et al., 2016)

Плюм Оби-Енисея в Карском море больше площади Черного моря!

Речные воды, втекающие в океан (плюм):

1. Приносят большое количество биогенов (“+”)
2. Уменьшают прозрачность вод (“-”)
3. Изменяют халинные характеристики и увеличивают стратификацию вод

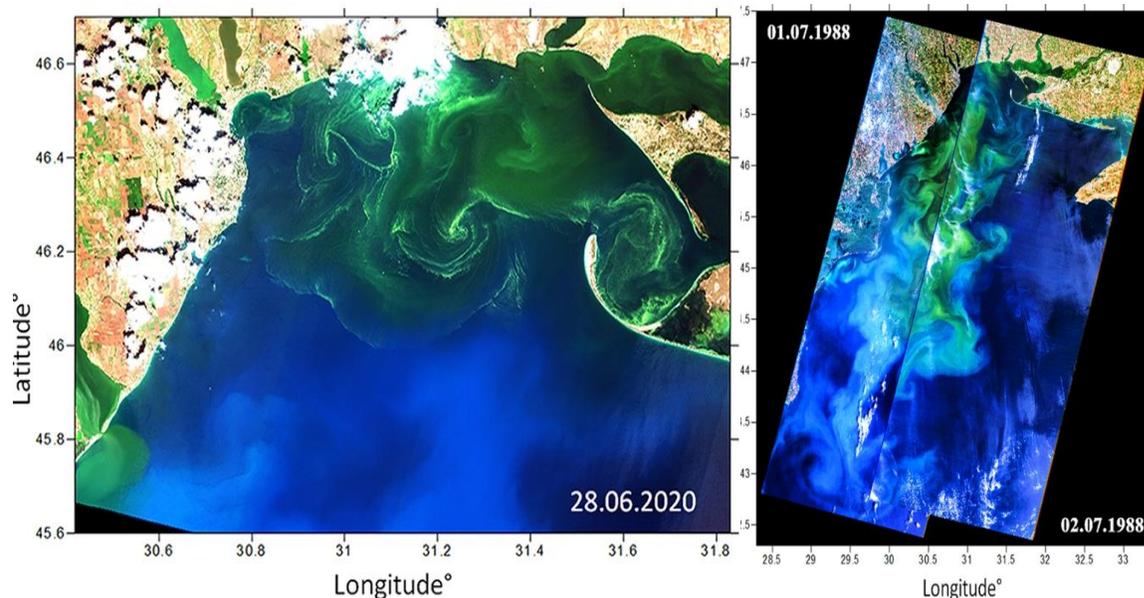


Расчет распространения речных вод Оби-Енисея по модели

Цветение цианобактерий в областях речных плумов

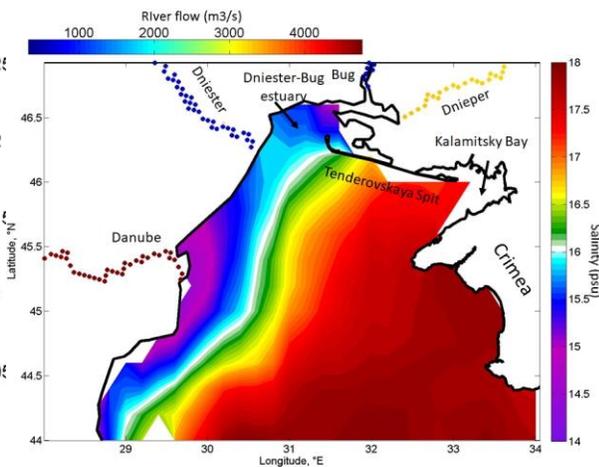
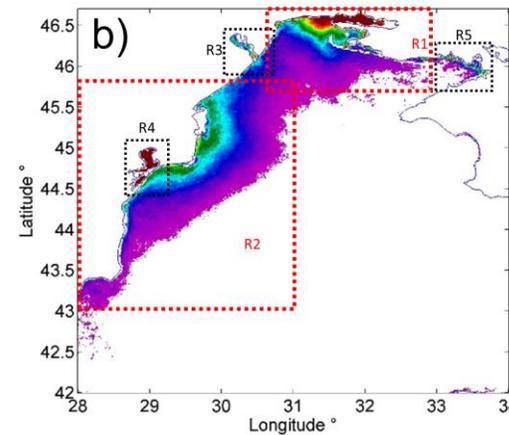
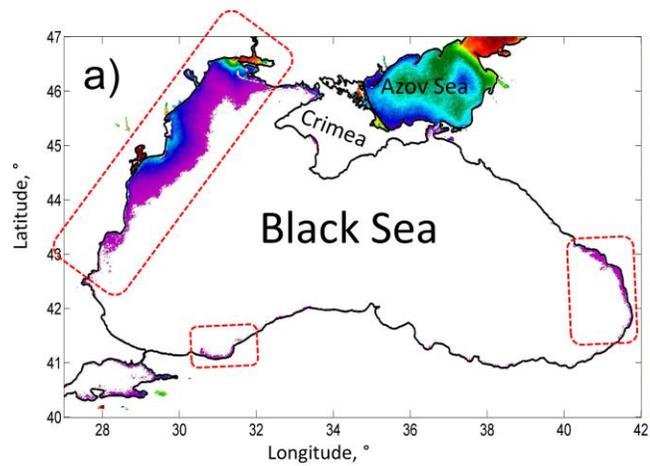
Цианобактерии способны вызывать резко негативное влияние на экосистему:

- Выделяют токсины
- Вызывают гипоксию
- Приводят к резкой перестройке трофических цепей



Цианобактерии в Черном море по данным Landsat

Цианобактерии – преснолюбивые водоросли, которые существуют только в областях пониженной солености и существенно зависят от движения речных вод



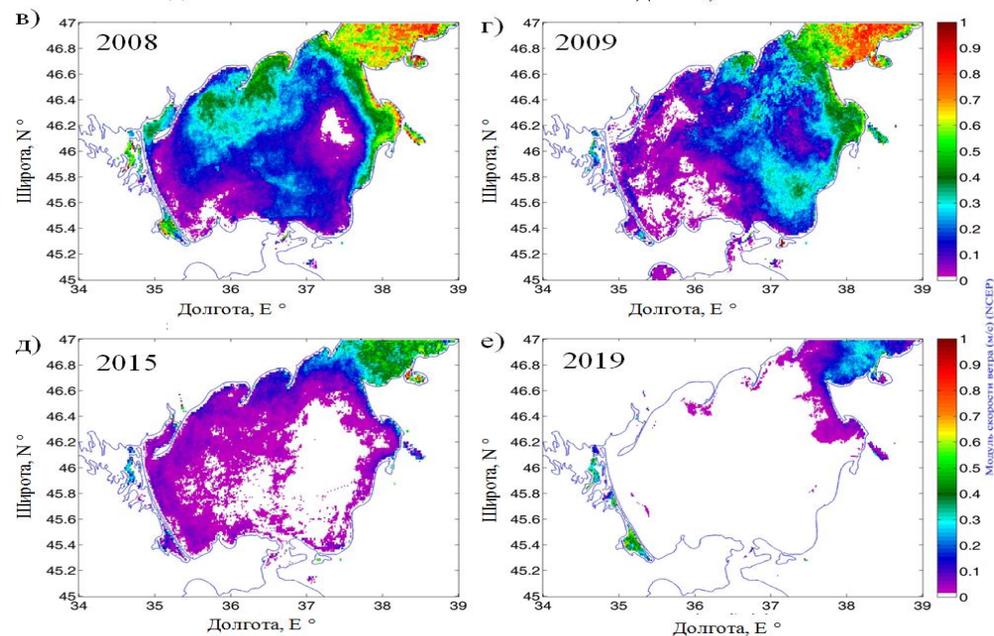
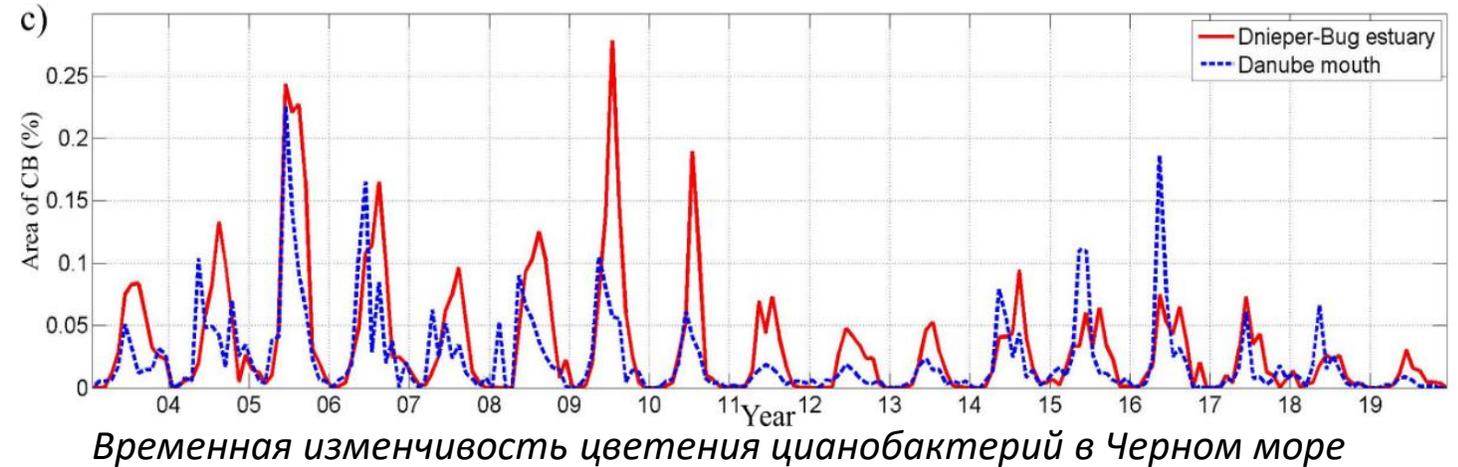
Соленость

Среднее распределение цианобактерий в Азово-Черноморском регионе по данным MODIS

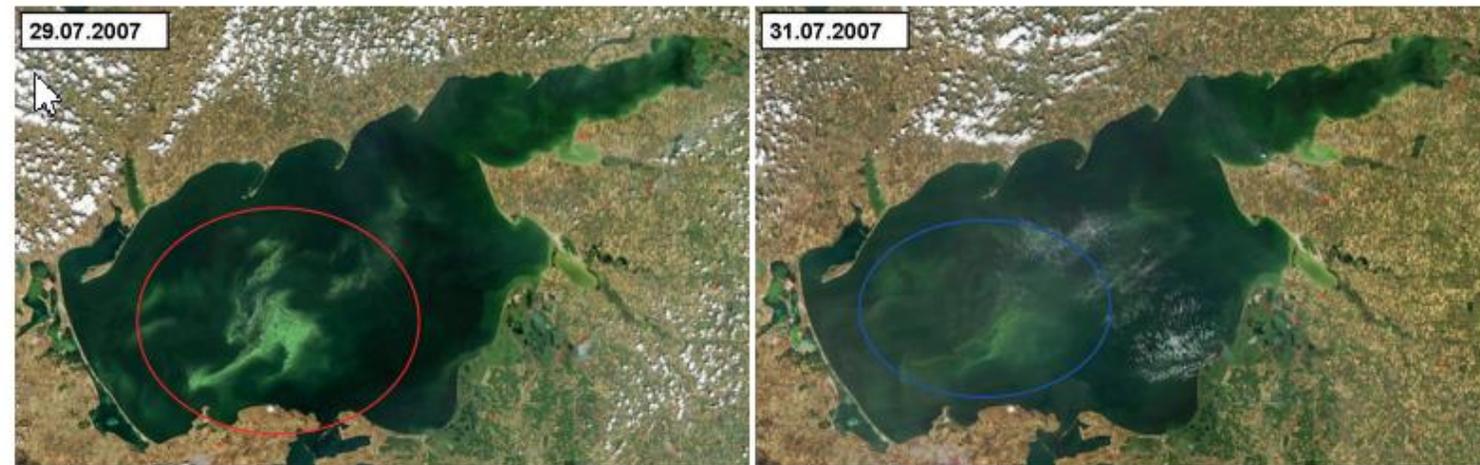
Влияние ветрового воздействия на цветения цианобактерий

Спутниковые данные показывают, что такие цветения развиваются в периоды штиля и резко прекращаются при усилении ветра

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

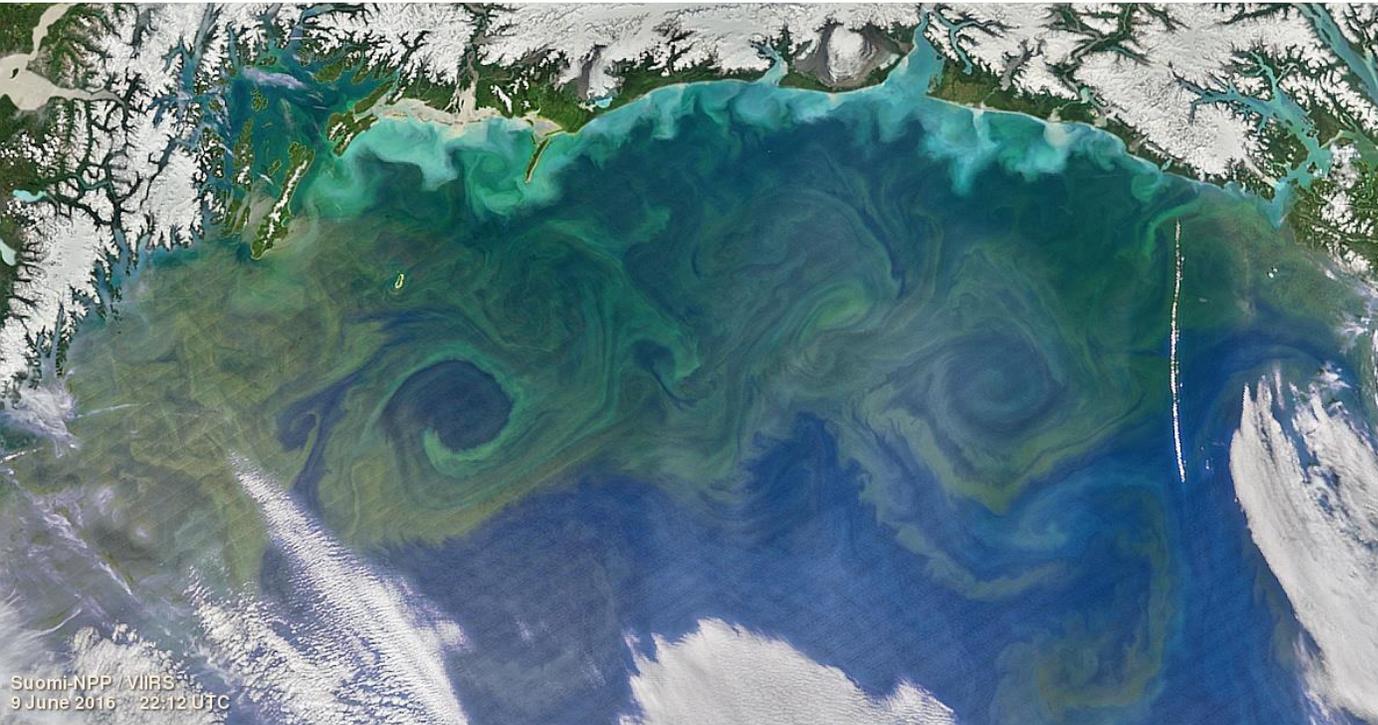


Пространственное распределение цветений в Азовском море в разные годы



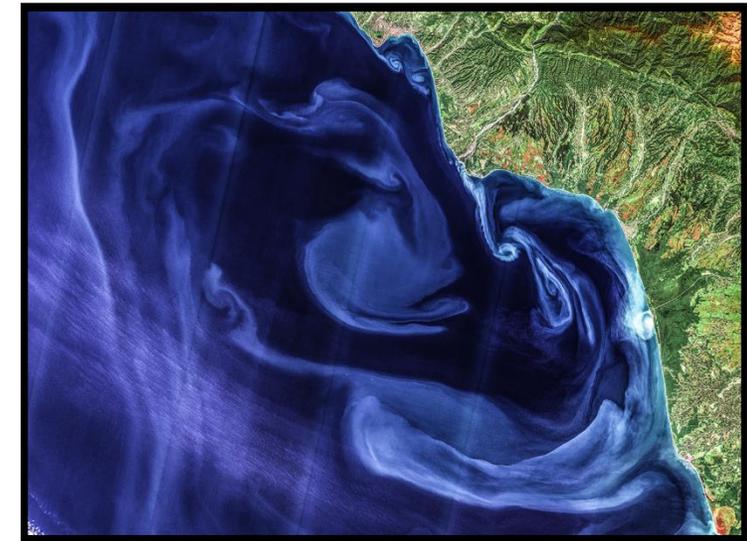
Резкое ослабление цветений цианобактерий из-за роста скорости ветра

Вихри у побережья Аляски



Вихревая динамика океана существенно влияет на смешение различных вод и выравнивание биологических характеристик в океане

Вихревой комплекс вблизи берегов Абхазии



Вихревой перенос в заливе Аден

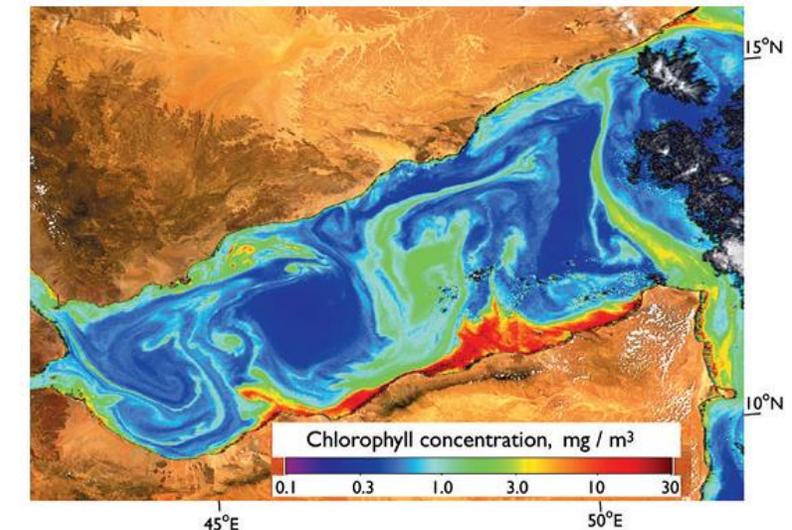
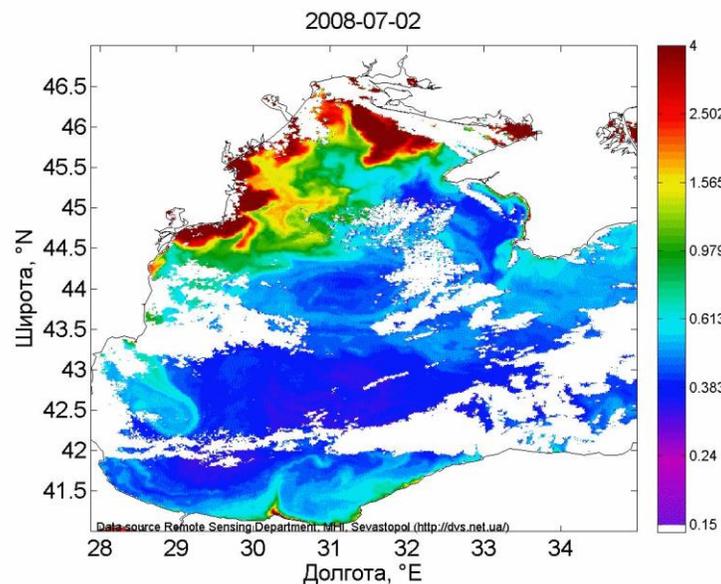
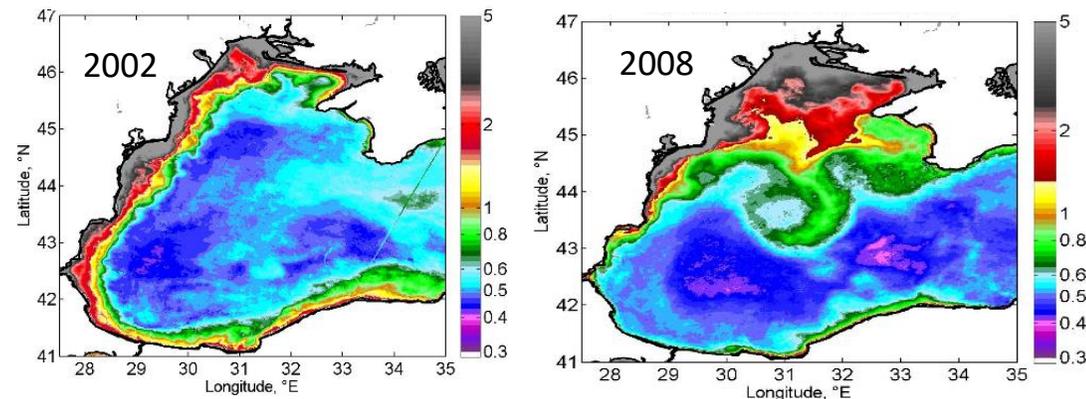


Figure 3.21. Map of chlorophyll concentration derived from the SeaWiFS overpass of the Gulf of Aden, between the Indian Ocean and the Red Sea, on November 1, 2003.

Изменчивость структуры океанических течений



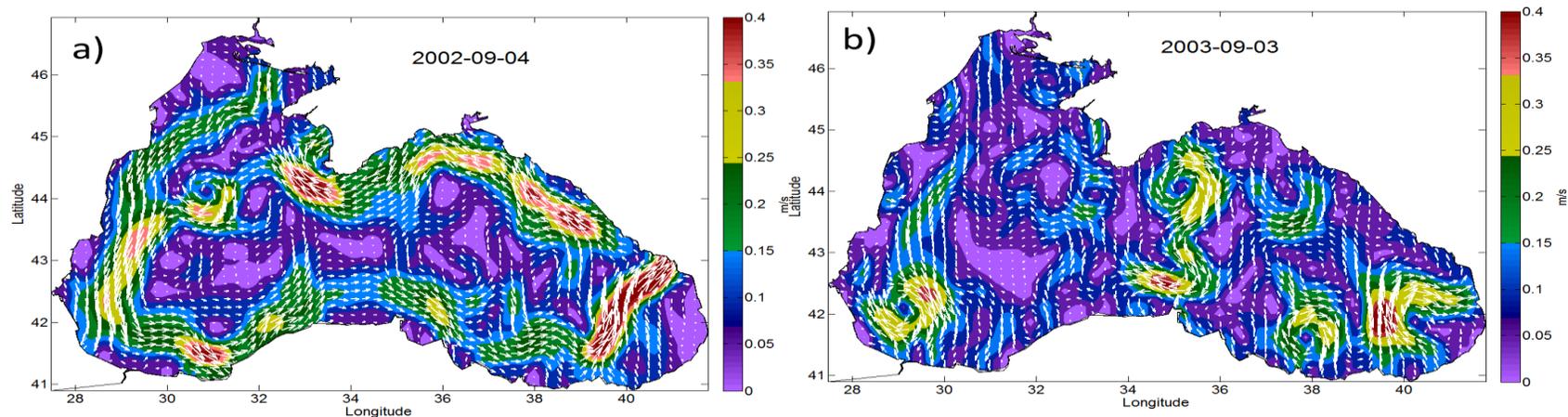
Черное море - в отдельные годы реки снабжают воды центральной части биогенами, а в другие остается у берега



Блокировка речных вод у берега в 2002 и их интенсивный перенос в центр моря на среднегодовых картах концентрации хлорофилла в Черном море

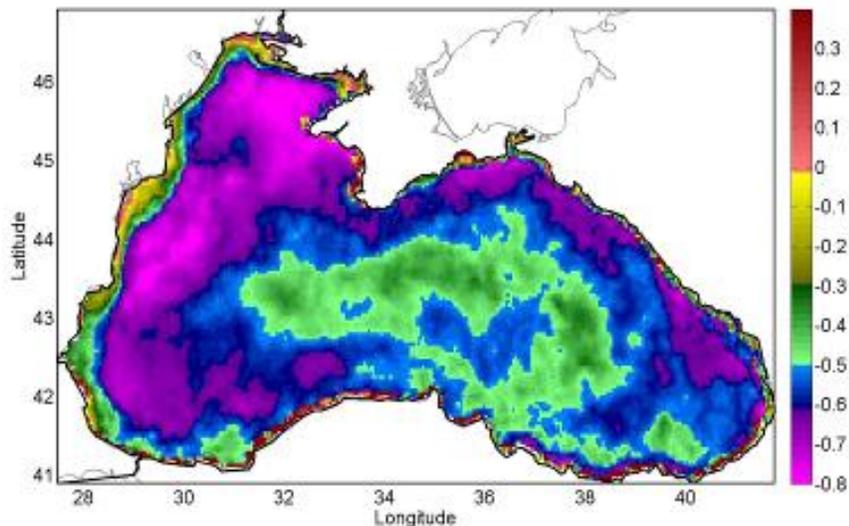
Поток вызванный одним таким вихрем в 10 раз превосходит сток реки Дуная!

Два режима циркуляции Черного моря – “струйный” и “вихревой”, которые зависят от интенсивности ветровой накачки – завихренности ветра

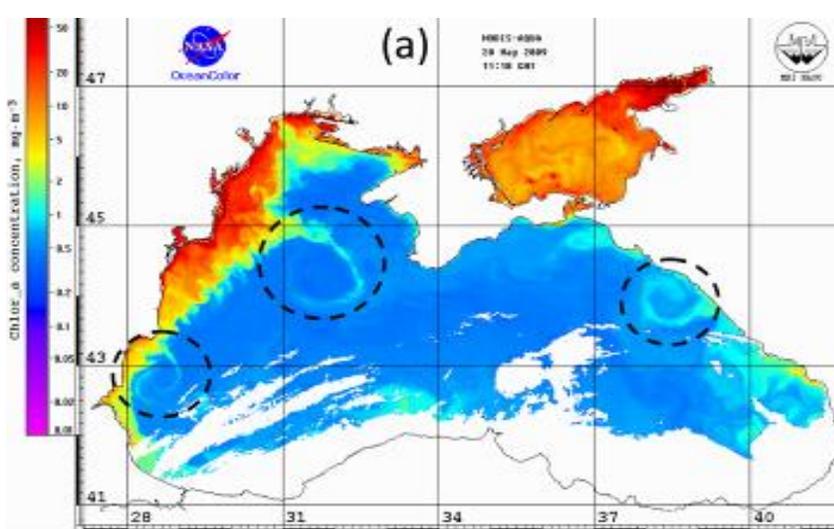


Карты скоростей течений Черного моря в сентябре 2002 и 2003 по данным спутниковой альтиметрии

Влияние динамики на изменчивость хлорофилла А в Черном море



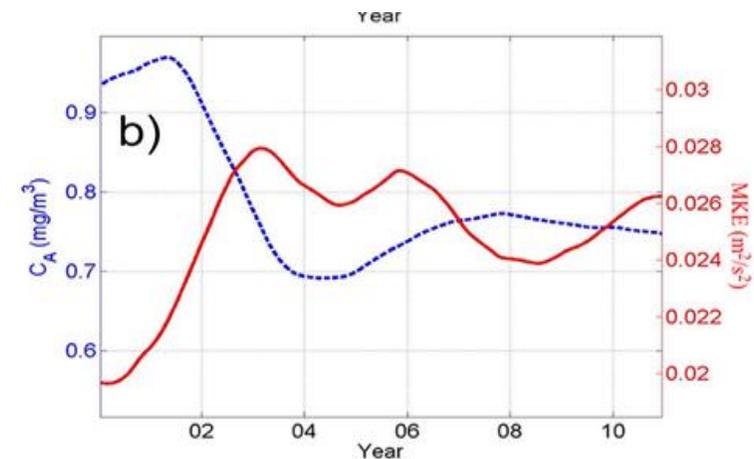
Корреляция между средней по бассейну МКЕ и концентрацией хлорофилла А в точке



Зоны влияния вихрей

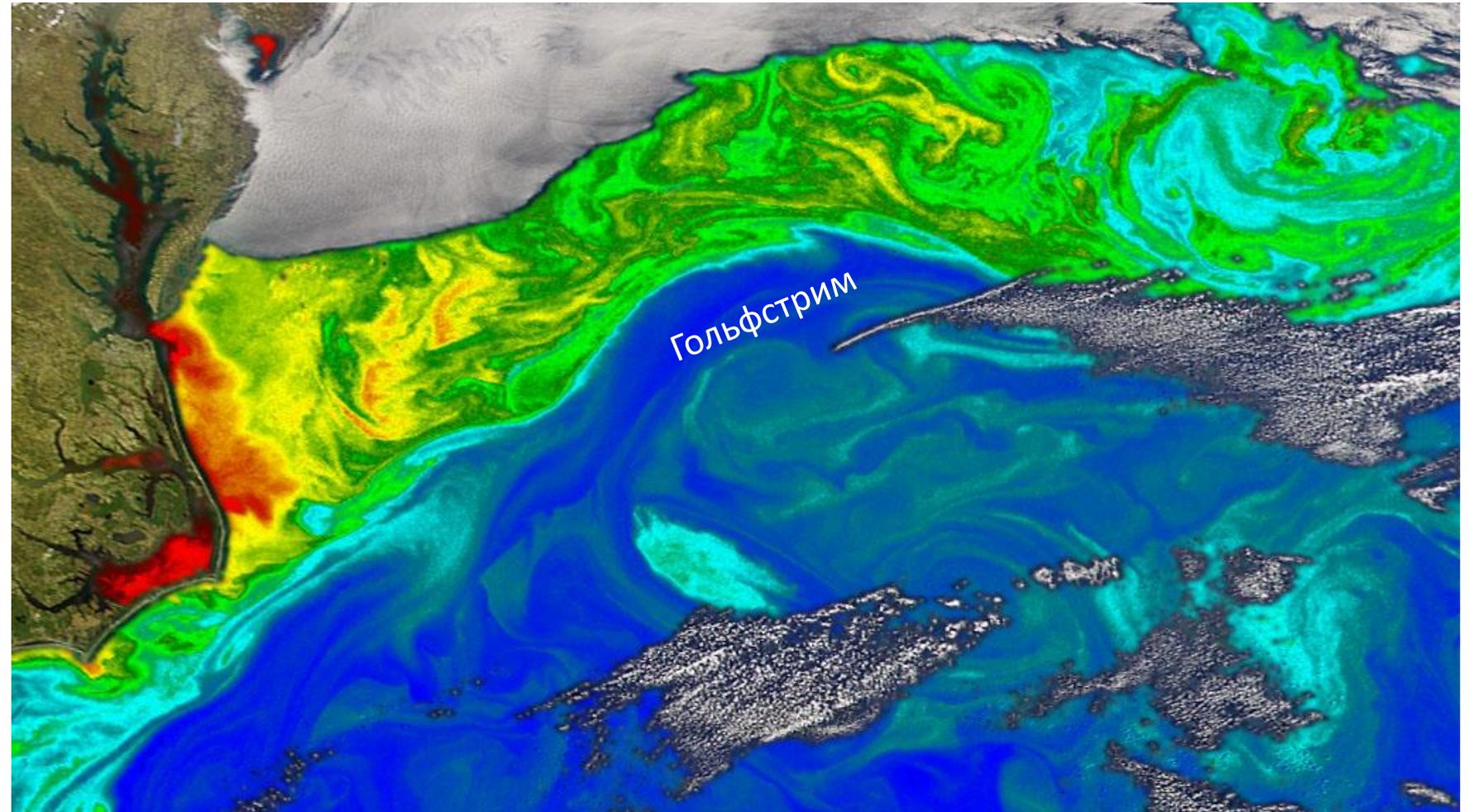
Усиление течений приводит к запиранию биогенов на шельфе и уменьшению концентрации хлорофилла А

Наиболее тесная связь между скоростью ОЧТ и цветением хлорофилла наблюдается на континентальном склоне – зоне влияния вихрей (корреляция -0.8)

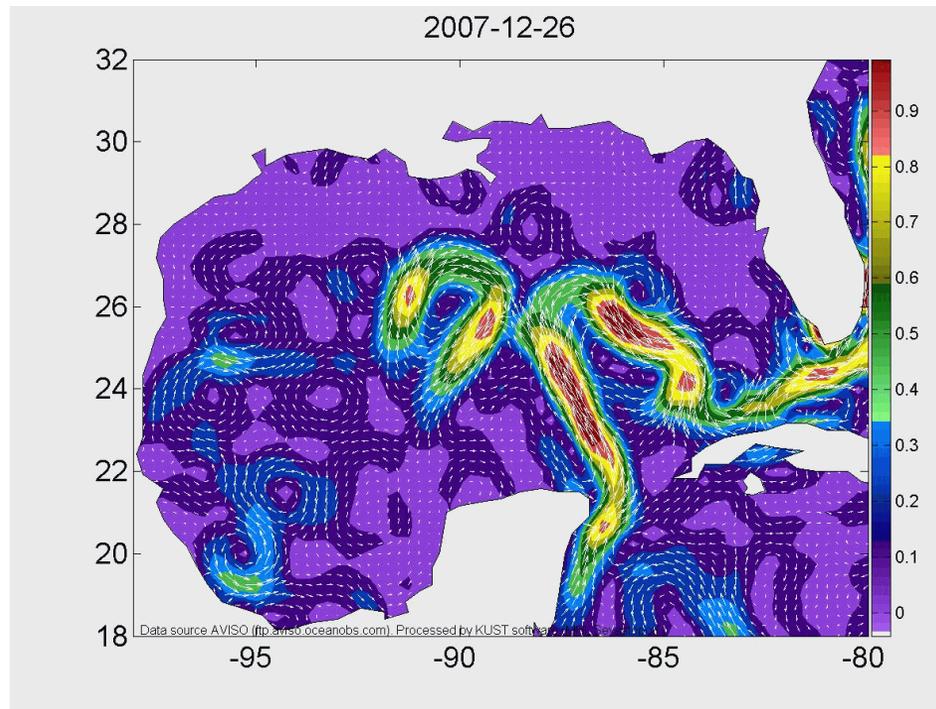
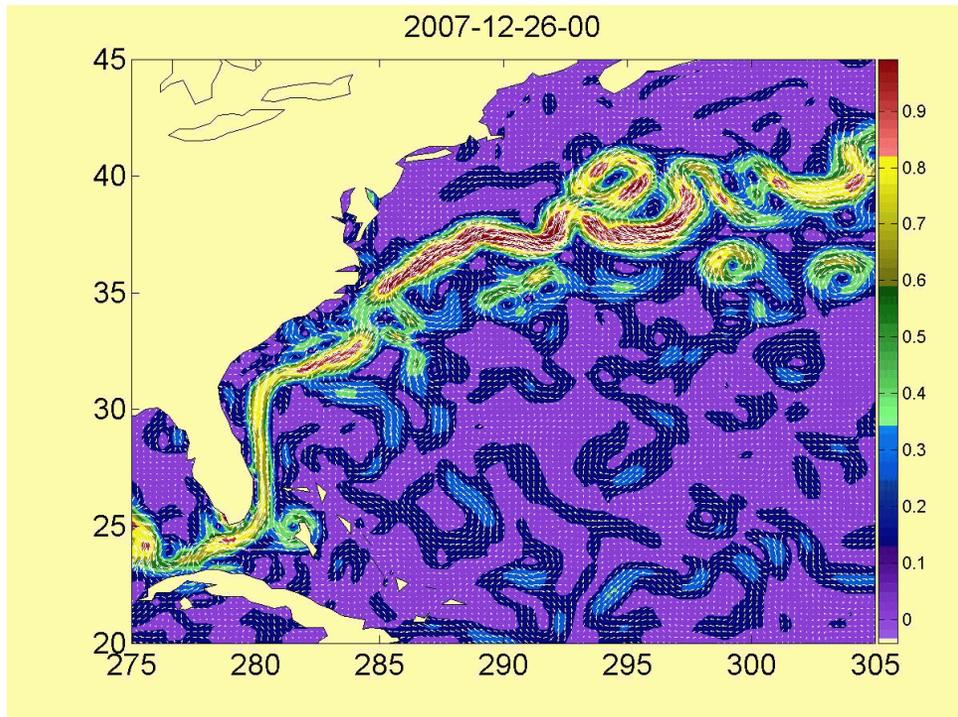


Изменчивость кинетической энергии течений (синяя линия) и Хл (красная) в центральной части моря

Гольфстрим –
стенка для
обмена вод
между бедной
субтропической
частью Атлантики
и богатой
субполярной

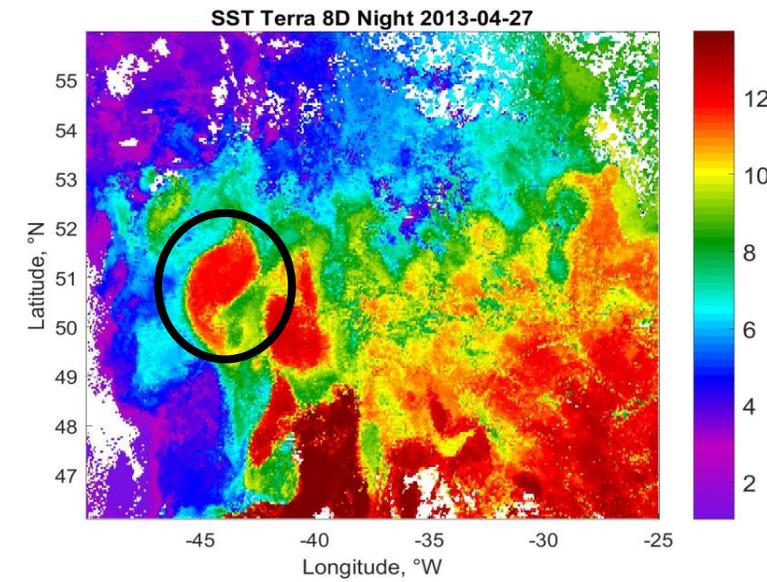
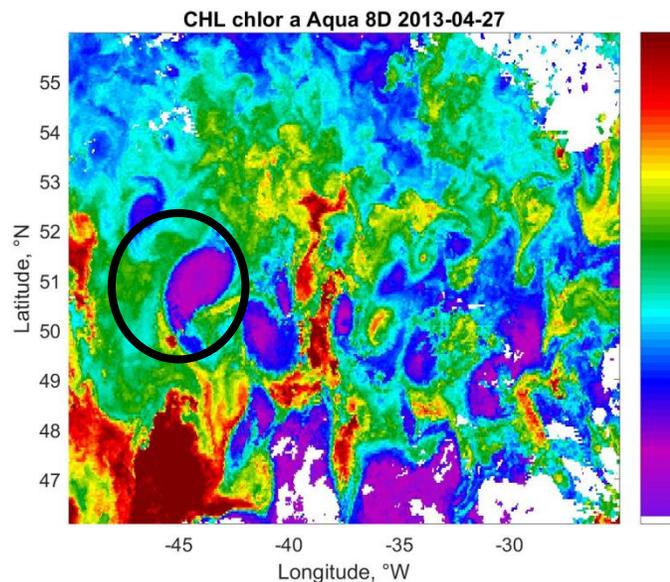


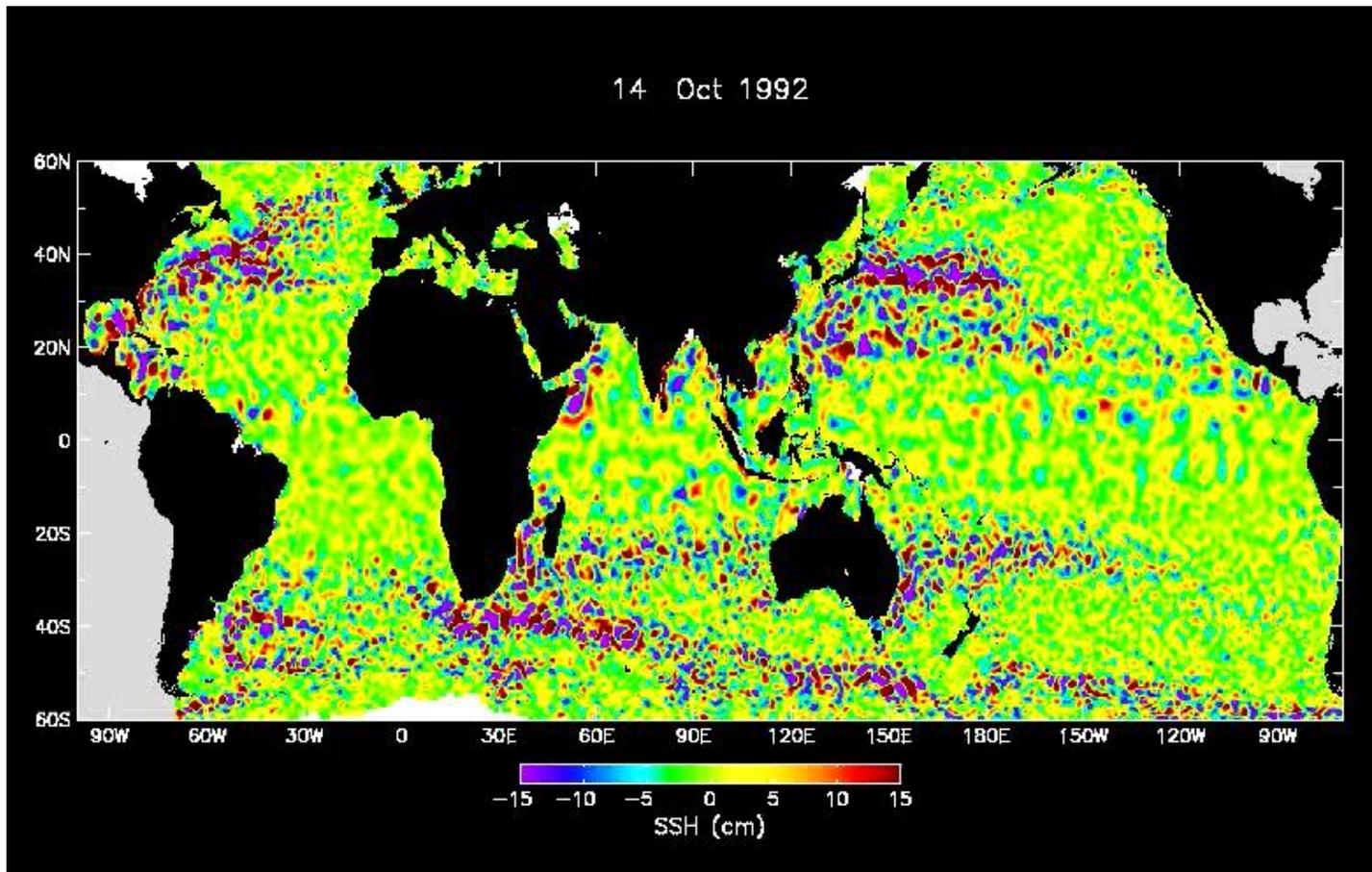
Меандрирование течений и отрыв рингов



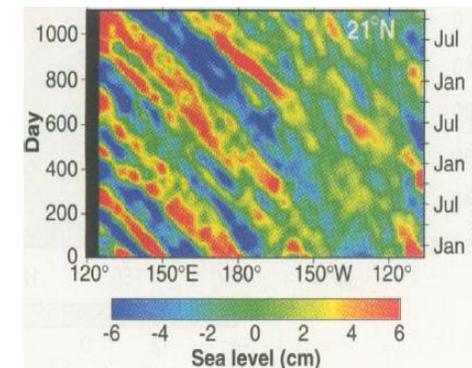
Меандрирование
Гольфстрима и
отрыв Мексиканской
петли по данным
альтиметров

Теплые и бедные воды субтропической Атлантики переносятся рингами Гольфстрима в богатые субполярные широты

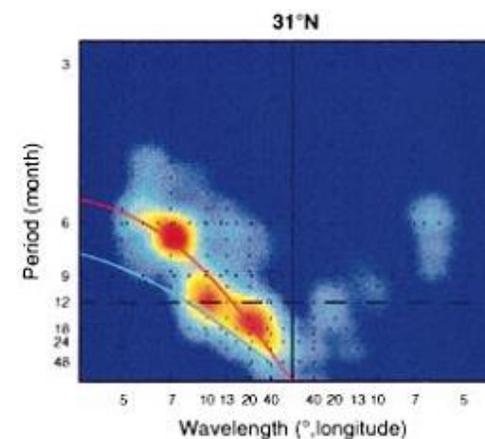




Изменчивость уровня в океане по измерениям спутниковых альтиметров

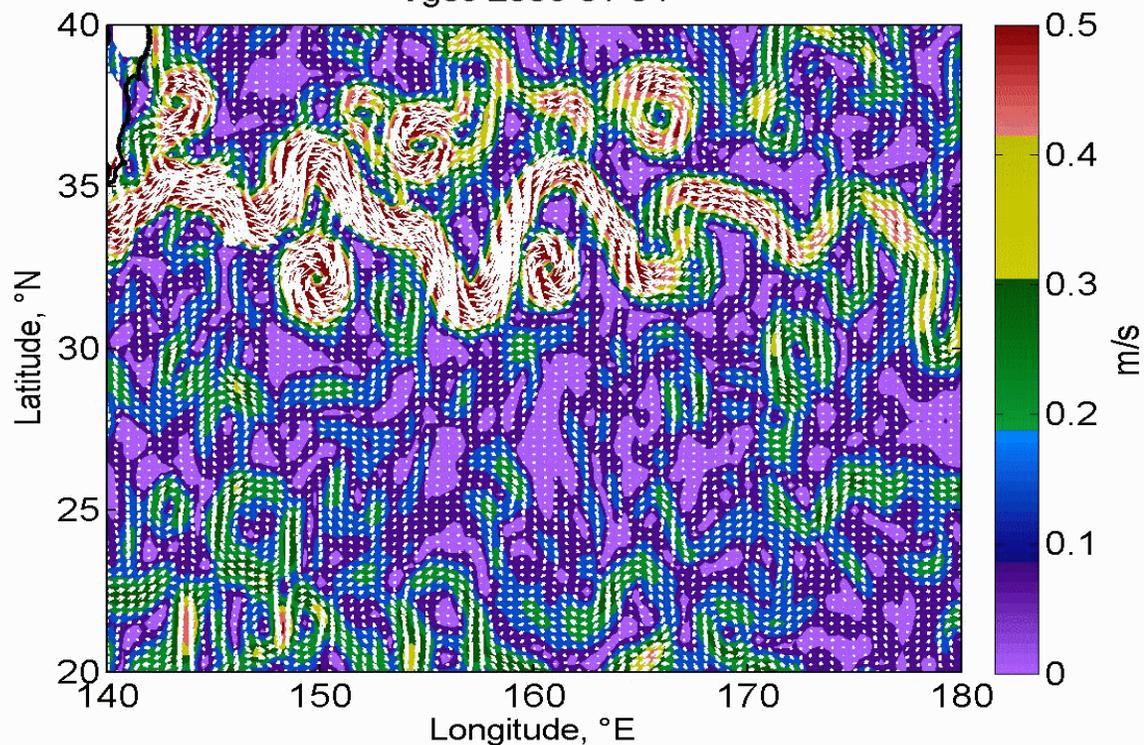


Основное движение в открытой части океана – направленные на запад планетарных волн Россби и вихри



Максимум спектральной энергии сосредоточен на синоптических масштабах

Vgeo 2006-01-04



Геострофическая скорость по альтиметрическим измерениям в районе Курошио

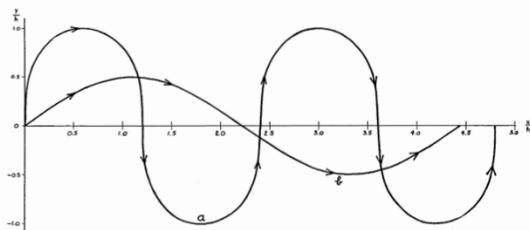
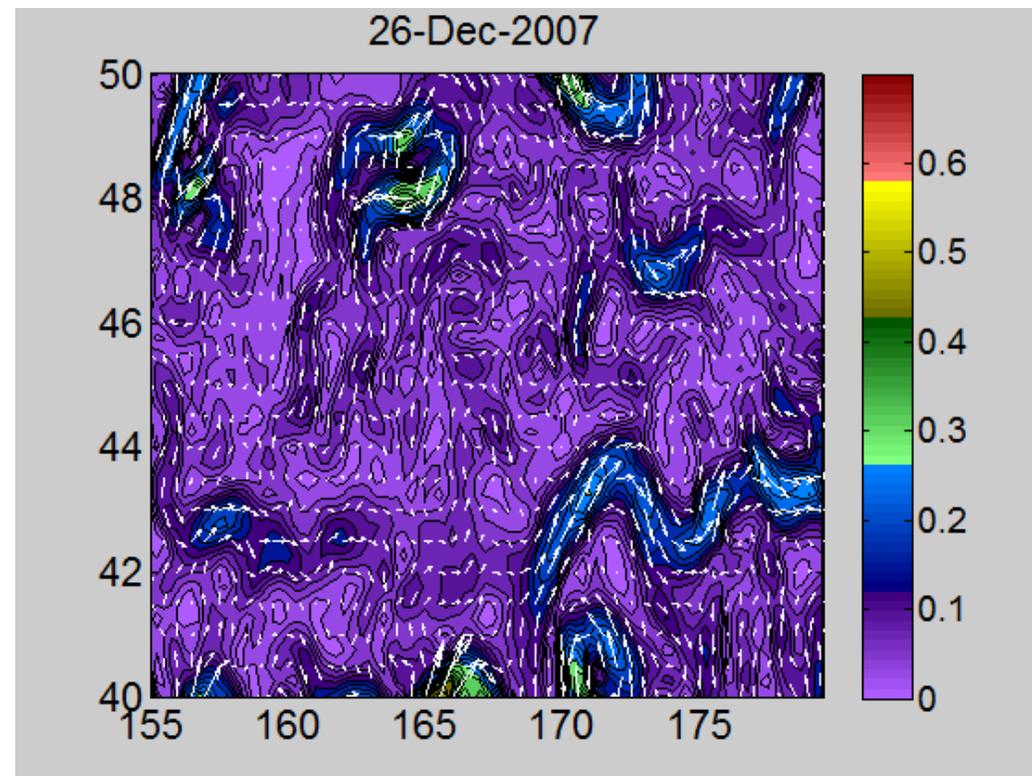


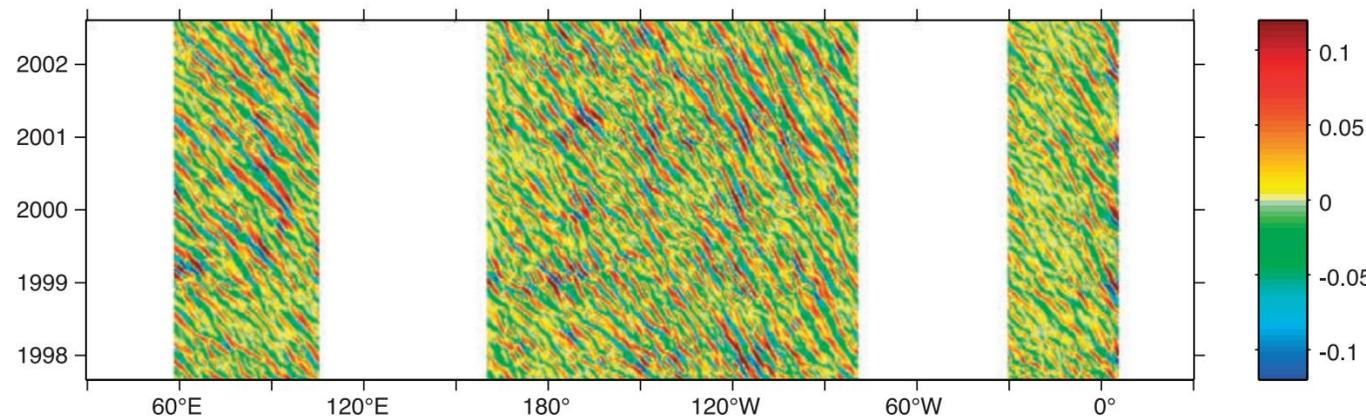
FIG. 1
Comparison of stationary waves in currents of finite, constant width, for large and for small amplitudes. Curve a represents a stationary flow pattern, the current intersecting its mean latitude at right angles. Curve b represents a stationary wave pattern of small amplitude and has the nature of a pure sine curve. In the diagram the amplitude of this latter wave is greatly exaggerated. The ratio between the two stationary wave-lengths is about 0.25. Geometrically these flow patterns are similar to inertia paths at the equator but physically they are of a different nature and can appear in any latitude.

Длительное образование в виде меандра мигрирует на запад.

На анимации скоростей течений отчетливо видны распространяющиеся на запад динамические сигналы - отдельные интенсивные вихри и области интенсивных геострофических течений



Волны Россби отчетливо проявляются в поле концентрации хлорофилла А (Killworth et al, 2004)



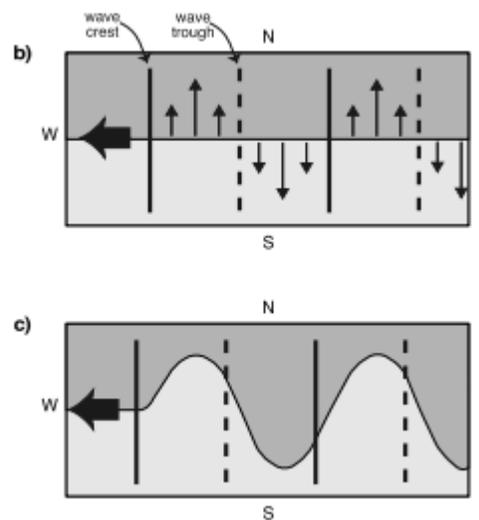
Killworth et al, 2004

Диаграмма Хл (x,d)

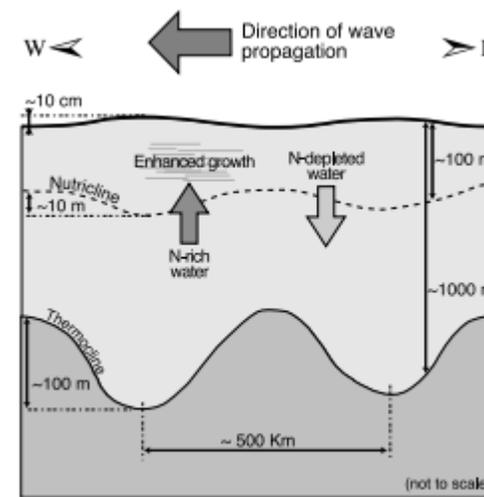
Выделяют несколько основных механизма влияния волн Россби биологическую продуктивность

1. Горизонтальная адвекция
2. Подъем/опускание биогенов
3. Подъем хлорофилла из под поверхности

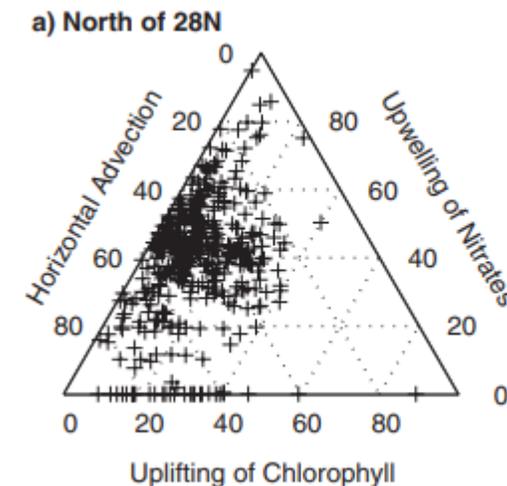
+ Влияние на перемешивание
+ Модуляция освещенности



Горизонтальная адвекция

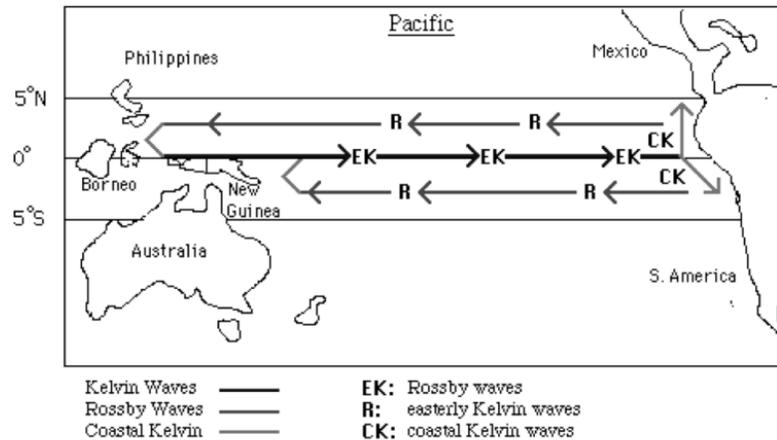
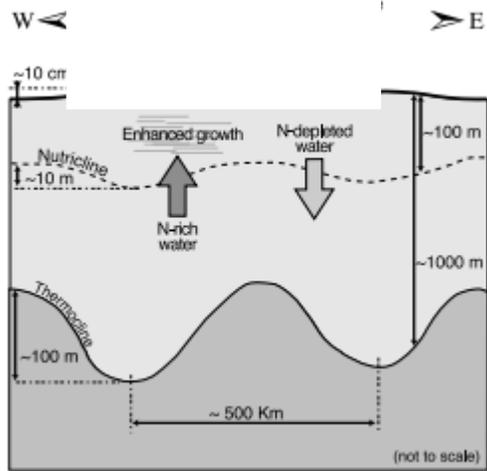


Вертикальная адвекция

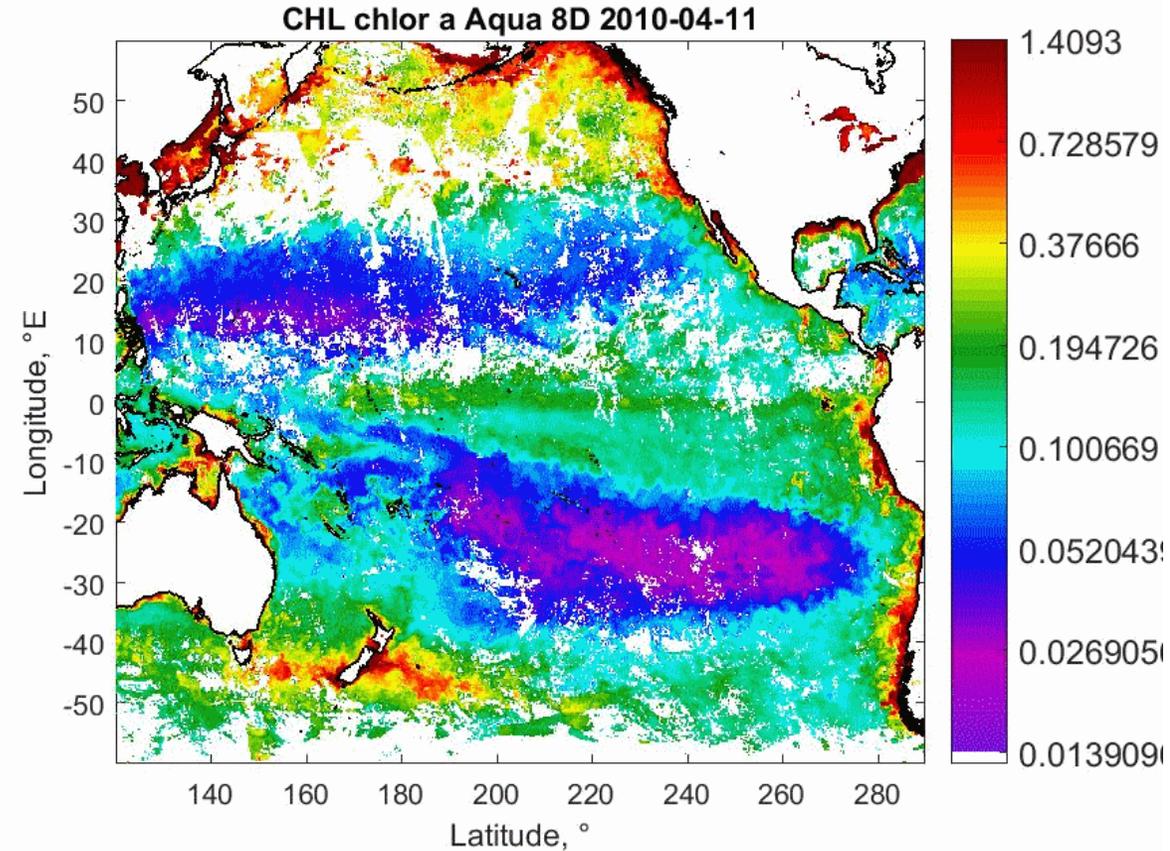


Оценка вклада различных механизмов (Charia et al., 2006)

Экваториальные волны Кельвина – вызывают резкий подъем биогенов в фотическую зону и вспышки цветений на экваторе, **самый крупный и быстрый волновой процесс, влияющий на динамику фитопланктона.**



www.gif-animator.com - UNREGISTERED



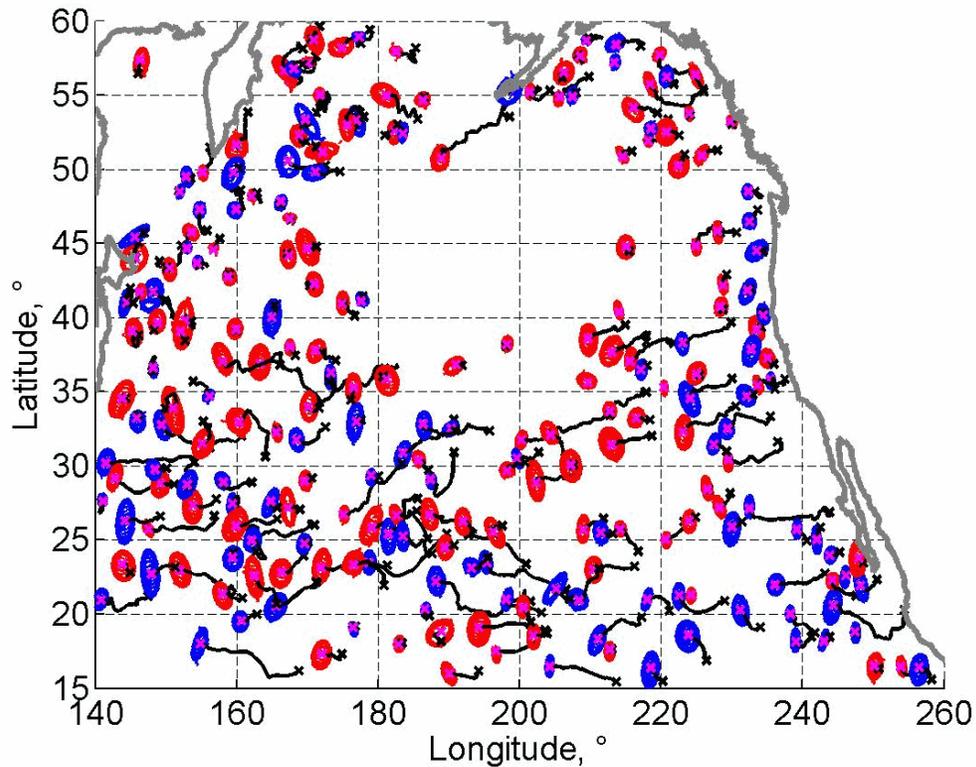
Вспышка цветения на экваторе под действием экваториальной волны

Экваториальные волны

Методы автоматической идентификации вихрей позволяют идентифицировать каждый вихрь в поле скорости и определить различные характеристики вихрей

www.gif-animator.com - UNREGISTERED

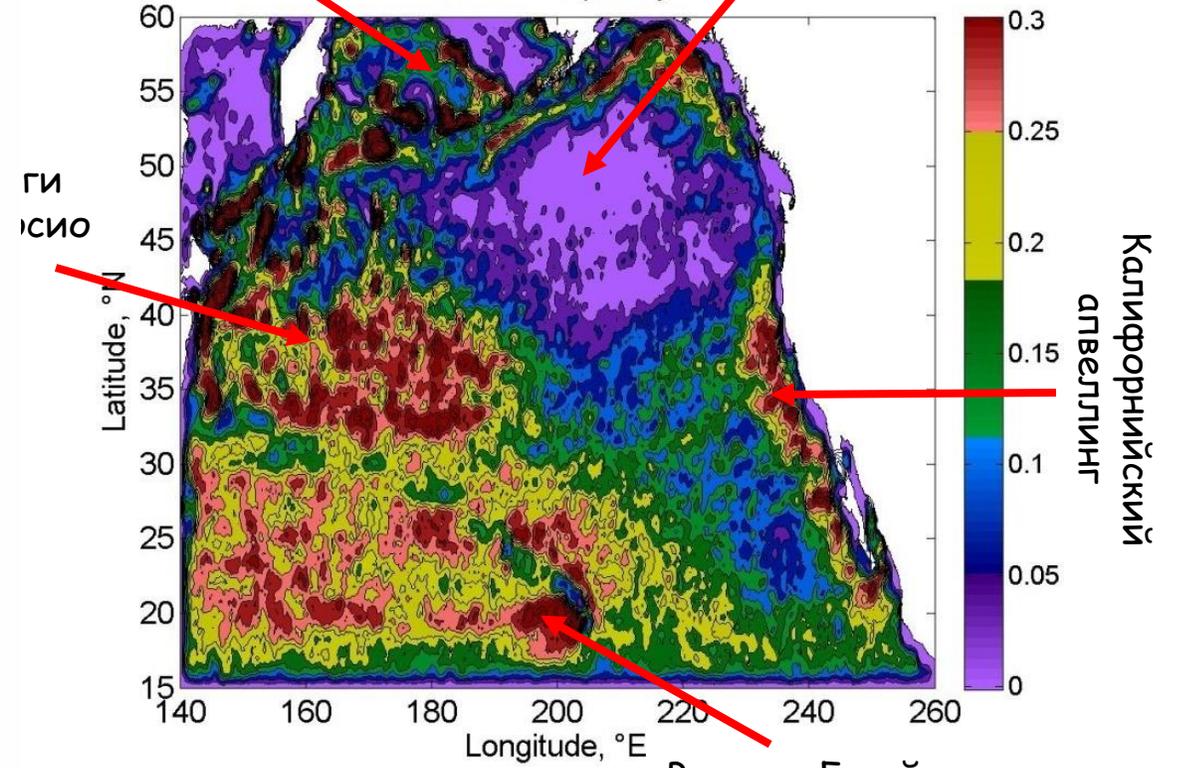
2005-01-05



Идентифицированные вихри в Тихом океане

Алеутские вихри Вихревая пустыня (Chelton, 2007)

Mean Frequency

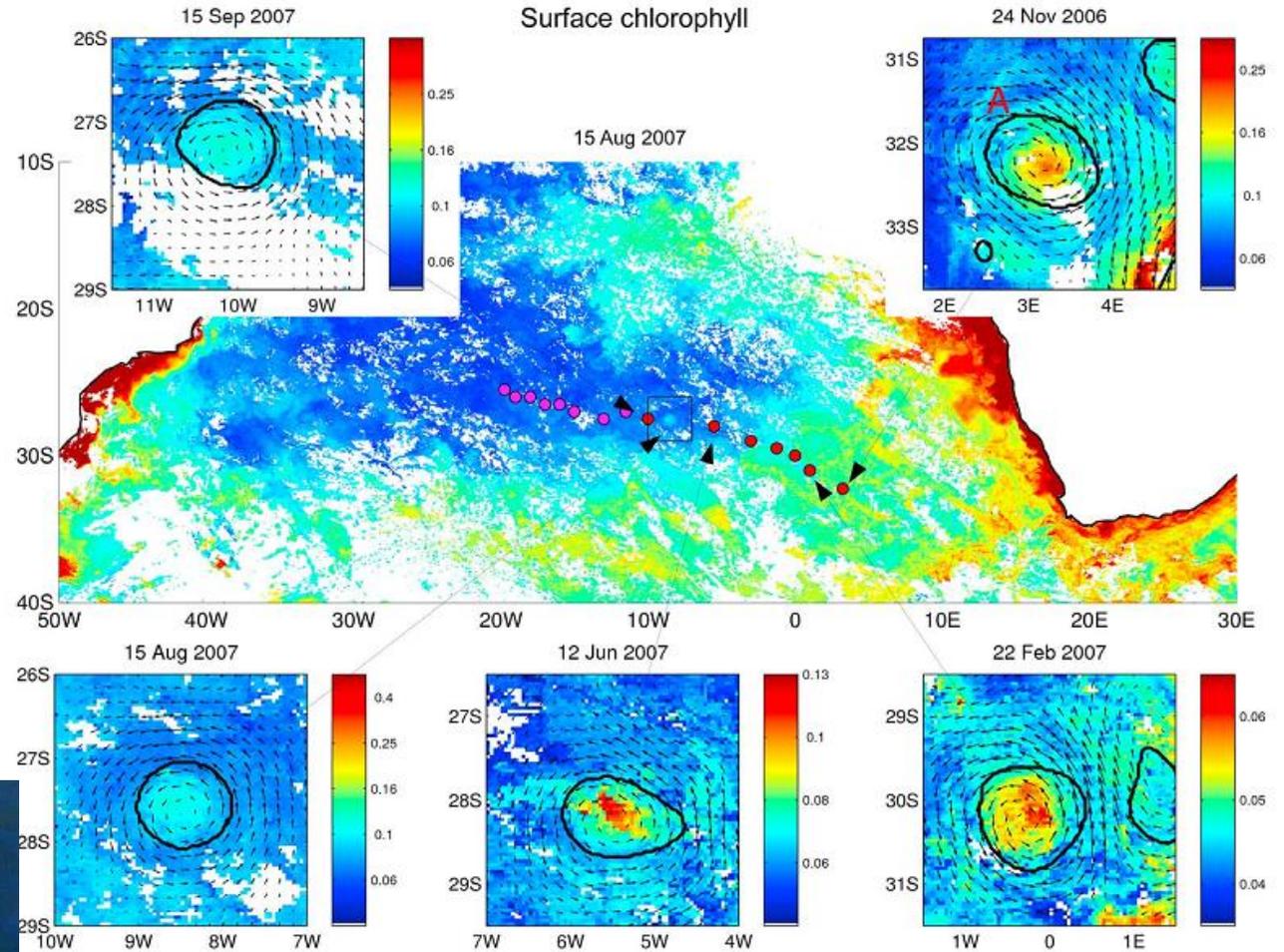
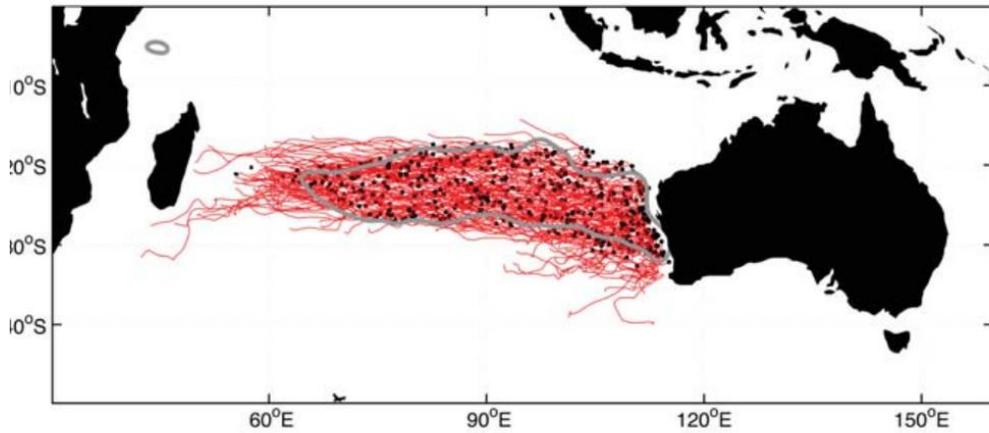


Частота наблюдения вихрей

Захват вод и транспорт в синоптических вихрях

Вихри способны захватывать воды и переносит их на тысячи километров, создавая оазисы жизни и сохраняя особенности экосистемы захваченных вод

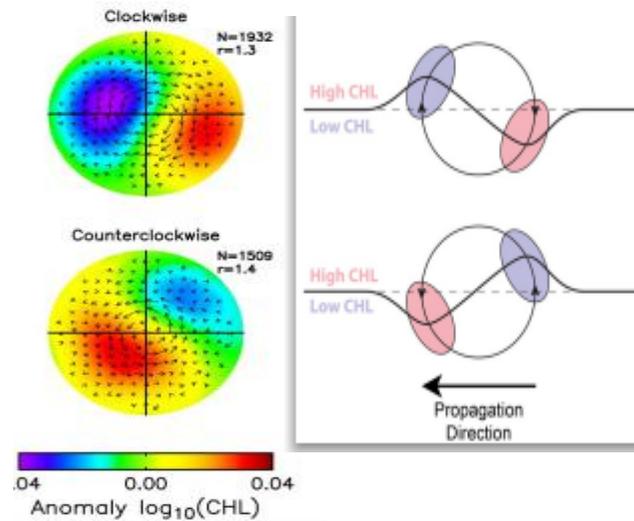
a) Trajectories of Anticyclones



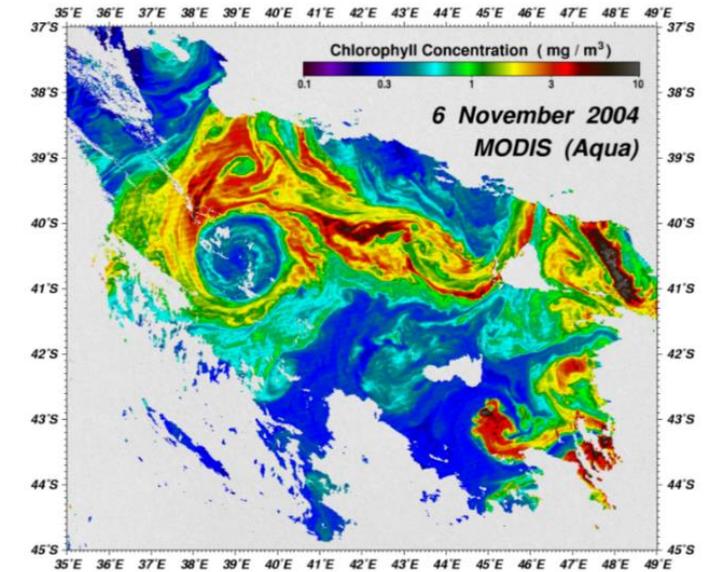
Lehahn et al., 2011

Композитный анализ данных альтиметров и спутниковых измерений хлорофилла А позволил выделить ряд механизмов влияния вихрей на экосистему:

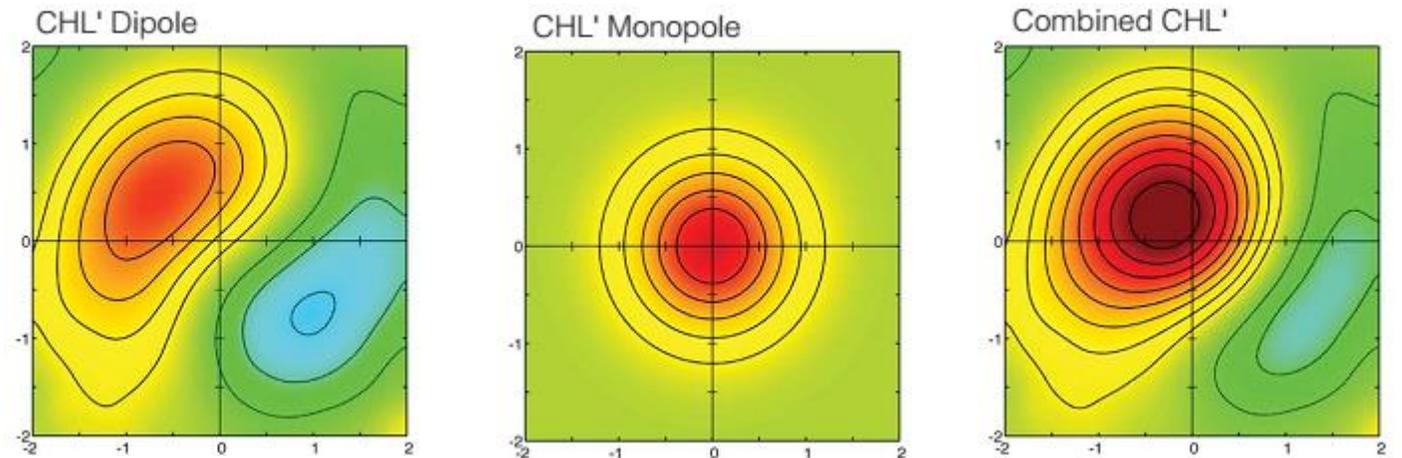
- 1) Горизонтальная адвекция – выравнивание свойств по горизонтали
- 2) Подъема/опускание биогенов:
 - циклоны богатые (подъем глубинных вод)
 - антициклоны бедные (опускание вод)
- 3) Интенсивное перемешивание на периферии в результате субмезомасштабных движений
- 4) Модуляция толщины ВКС и освещенности



Роль горизонтальной адвекции



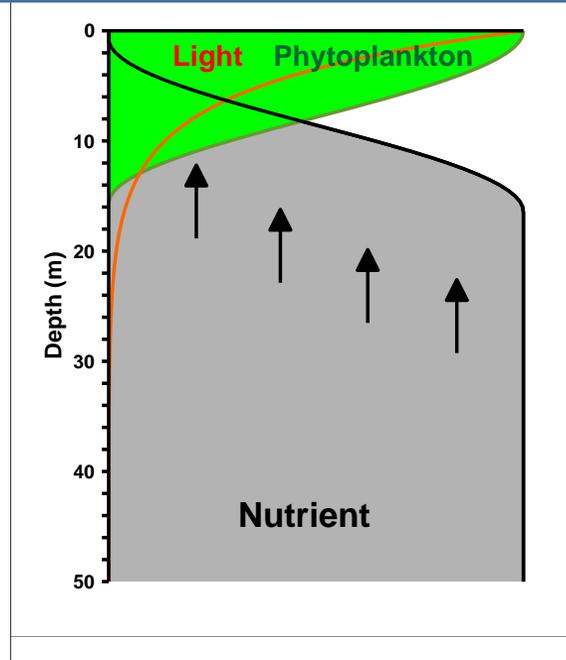
Вертикальные движения в вихрях



Структура аномалии хлорофилла в циклоне

2. Вертикальный обмен

Вертикальный обмен



Важнейшее влияние на динамику фитопланктона оказывают вертикальные движения

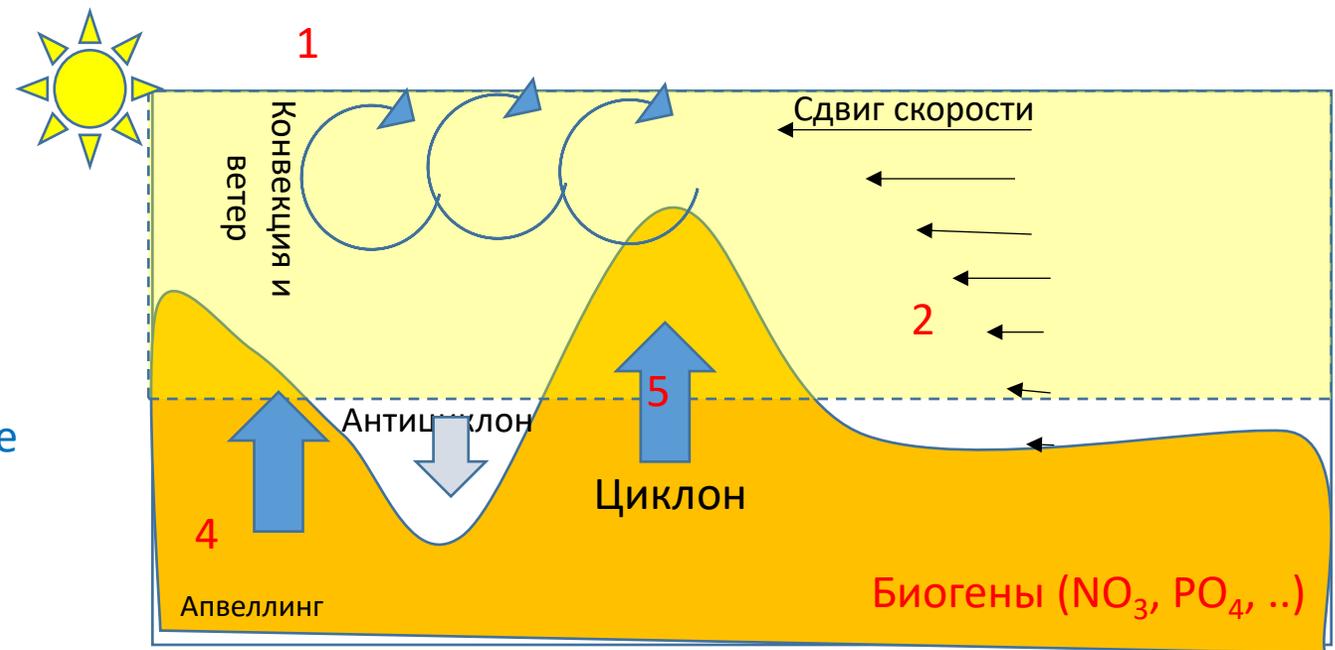
Биогены в верхнем слое, где есть свет (фотическом), быстро выедаются.

Фитопланктон оседает, и в нижнем слое опять переходит в неорганическое вещество (биогены) – реминерализация

При усилении вертикальных движений биогены попадают в верхний слой – происходит цветение фитопланктона

Процессы, которые влияют на вертикальный обмен:

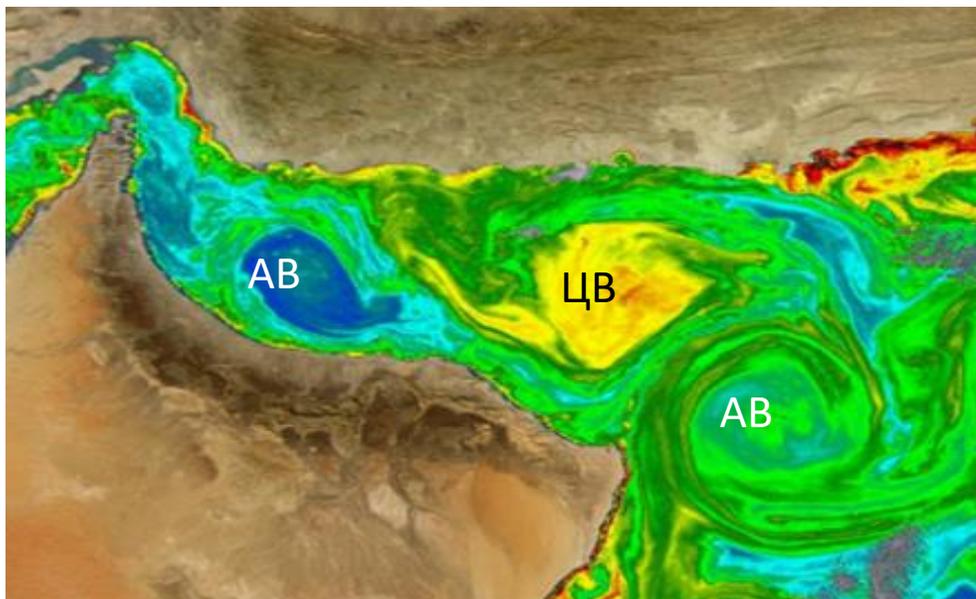
- 1. Вертикальный подъем вод (адвекция)** в вихрях, круговоротах, прибрежных апвеллингах,
- 2. Вертикальное перемешивание:** конвективное (вызванное охлаждением), ветровое, сдвиговое (сдвиг течений) и др.



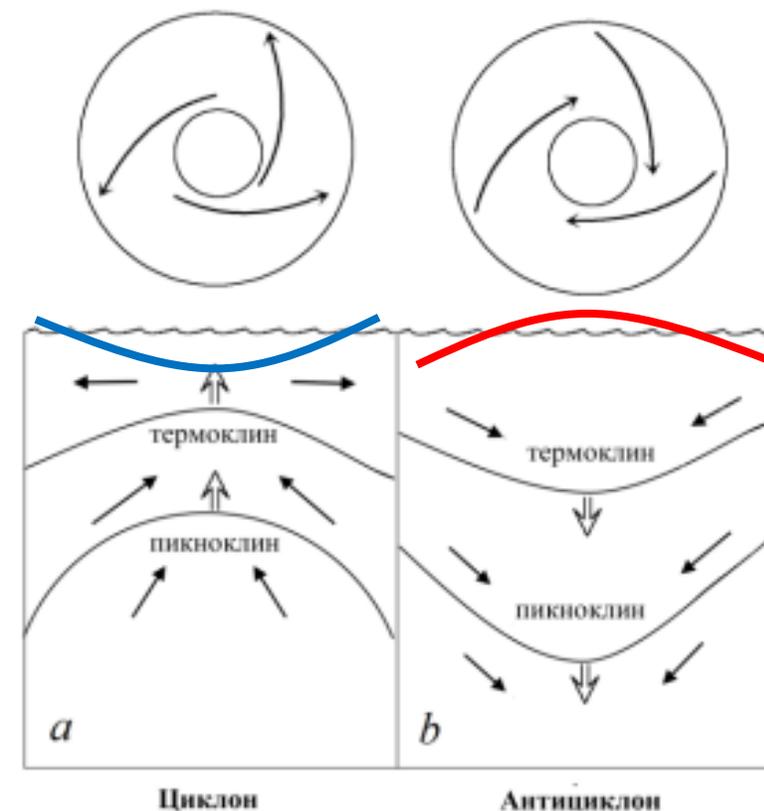
Определяющее влияние на вертикальный перенос вод оказывает **конвергенция** и **дивергенция**

Конвергенция – течения сталкиваются и поверхностные воды движутся вниз

Дивергенция - течения расходятся и воды поднимаются



Влияние вихрей на вертикальные движения



Одна из причин возникновения крупных зон конвергенции/дивергенции - вихревые движения

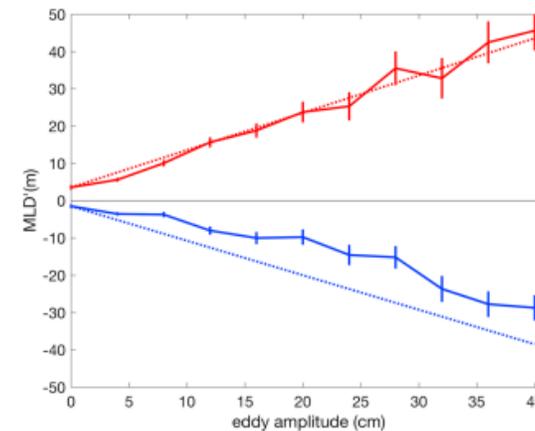
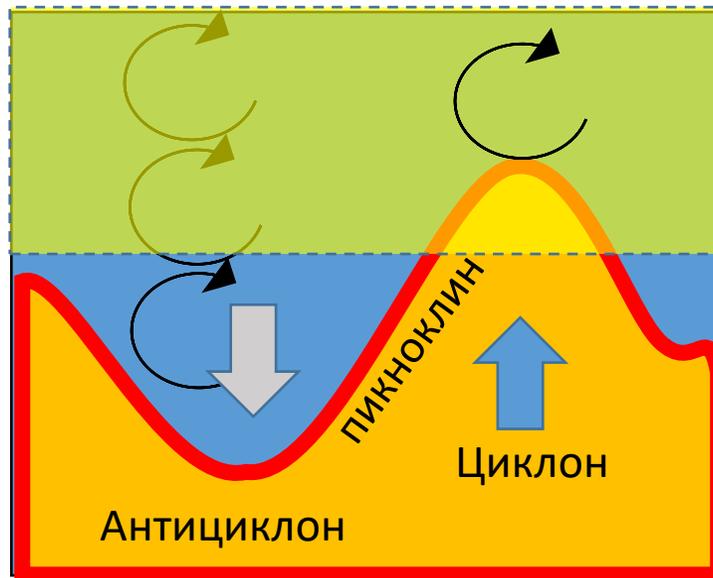
В антициклонах – конвергенция – движения вниз – меньше биогенов – меньше фитопланктона

В циклонах – дивергенция – движения вверх – больше биогенов – больше фитопланктона

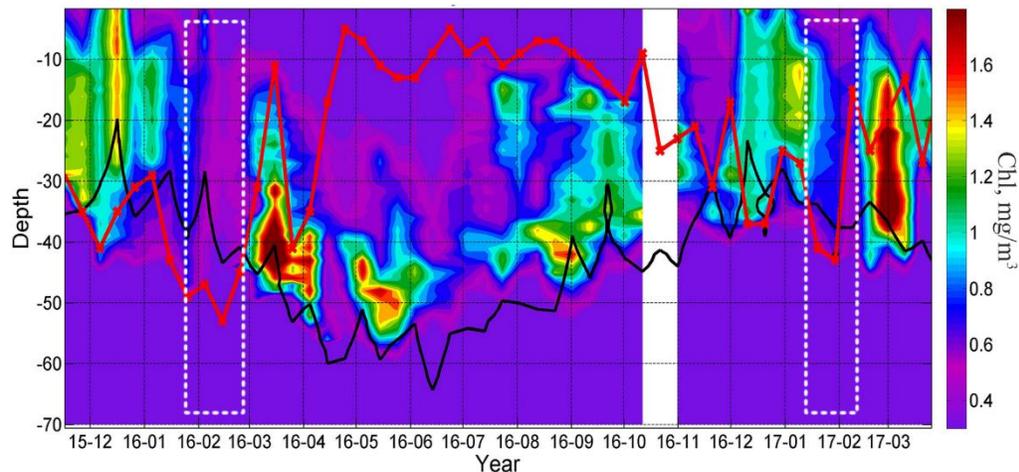
Влияние вихрей на ВКС и освещенность

В зимний период в зонах **конвергенции опускания вод** - заглубляется пикноклин – барьер, сдерживающий перемешивание → глубже перемешанный слой

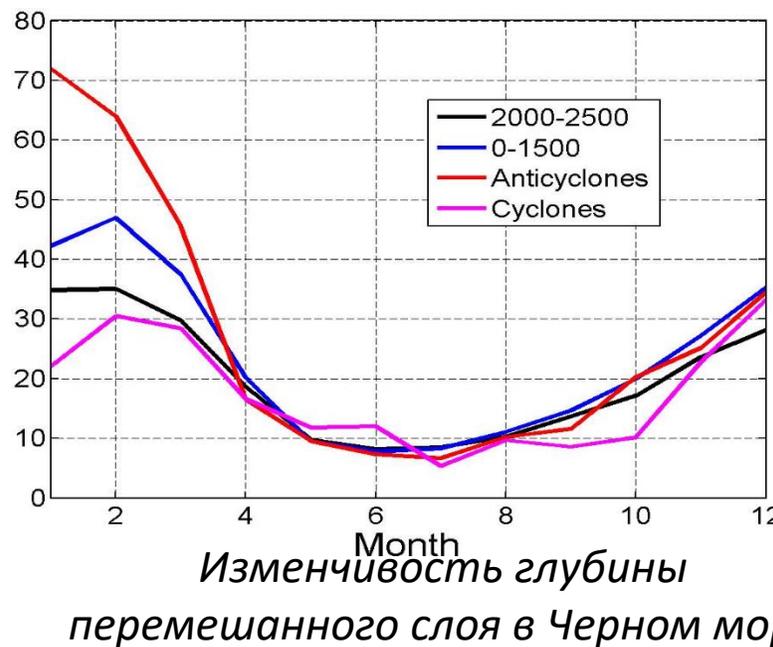
В результате из-за недостатка освещенности гибнет фитопланктон (Критерий Свердрупа)



Глобальные оценки связи интенсивности вихрей и аномалии толщины ВКС (Gaube et al., 2019)



Хл в Черном море по данным буя Био-Арго №7900591



В Черном море в антициклонах ВКС может быть в 3 раза выше, чем в окружающих водах

Такие события приводят к тому, что в феврале в Черном море в антициклонах фиксируется минимальные значение Хл во всем водном столбе.

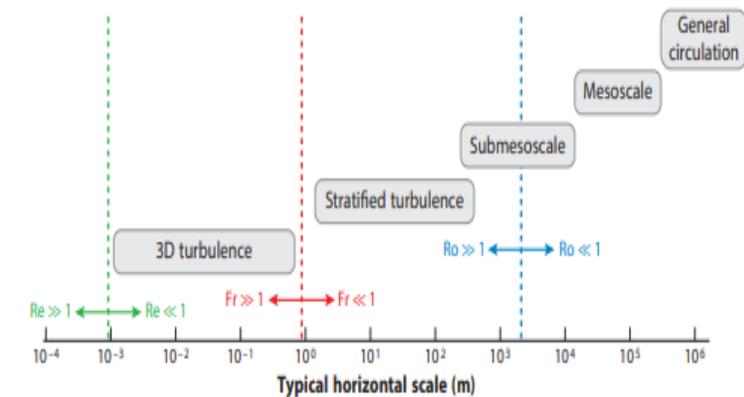
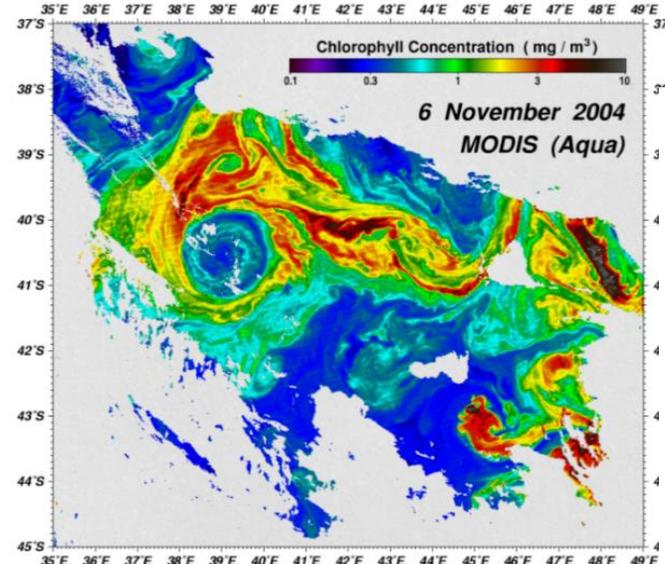
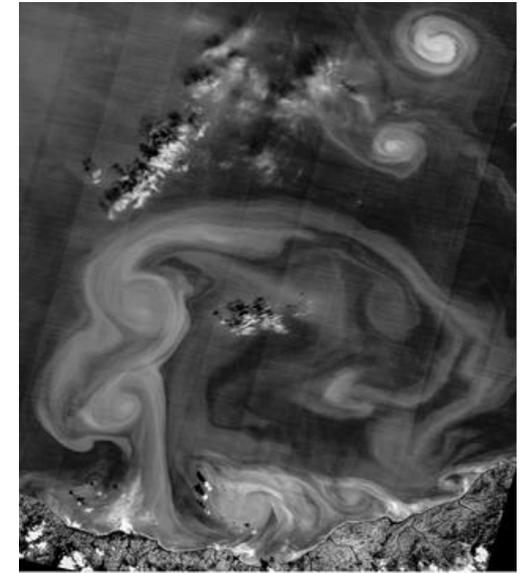
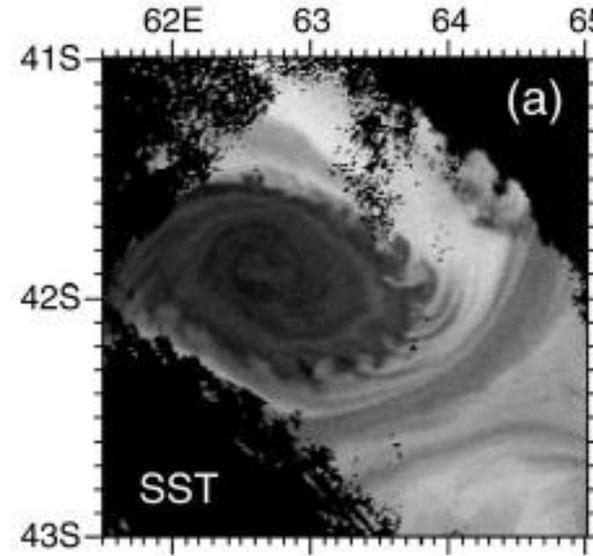
Субмезомасштабные вихри – в 10 раз меньше, чем синоптические, но имеют те же горизонтальные скорости

$W=V/R$ - завихренность в 10 раз больше

Интенсивные субмезомасштабные движения на периферии крупных вихрей значительно усиливают вертикальный и горизонтальный обмен:

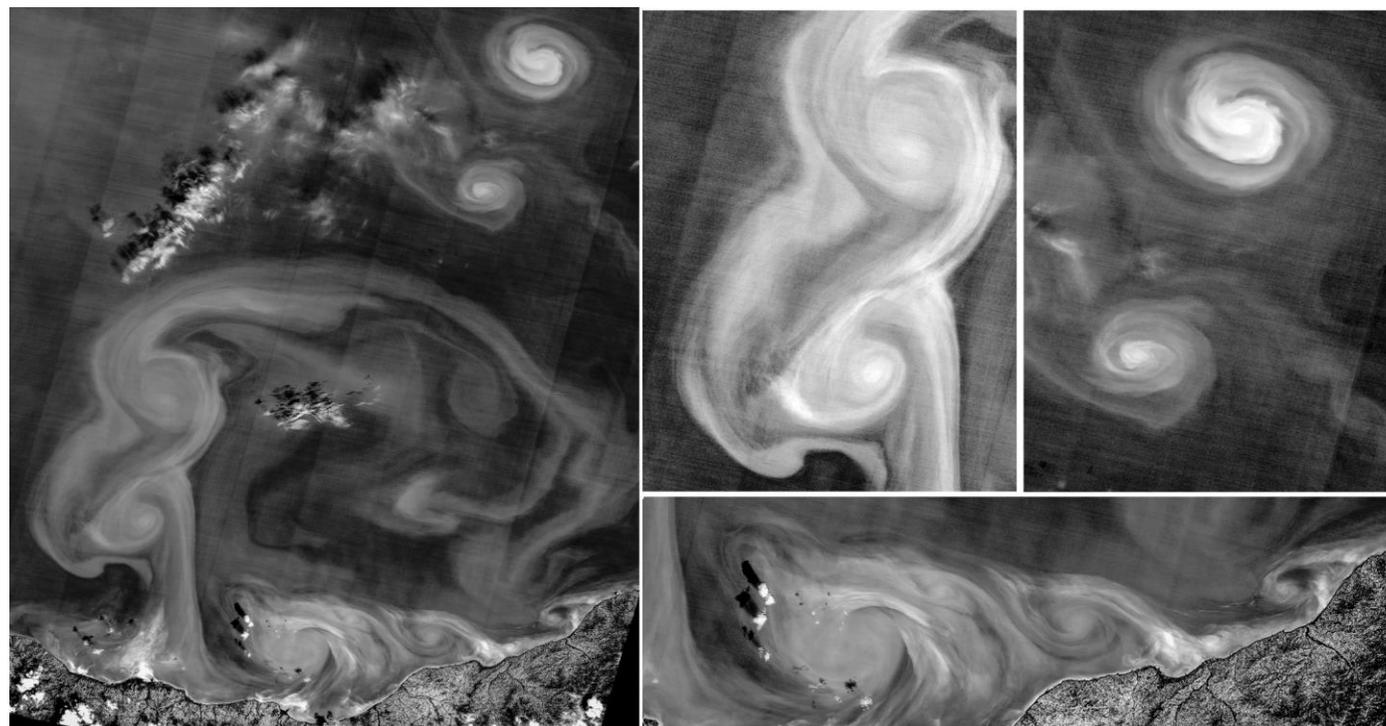
- Поясное цветение на периферии антициклонов
- Перенос примеси в ядрах от берега
- Интенсивное горизонтальное перемешивание в районах фронтов

Роль и особенности глобальных характеристик субмезомасштабных движений изучены недостаточно

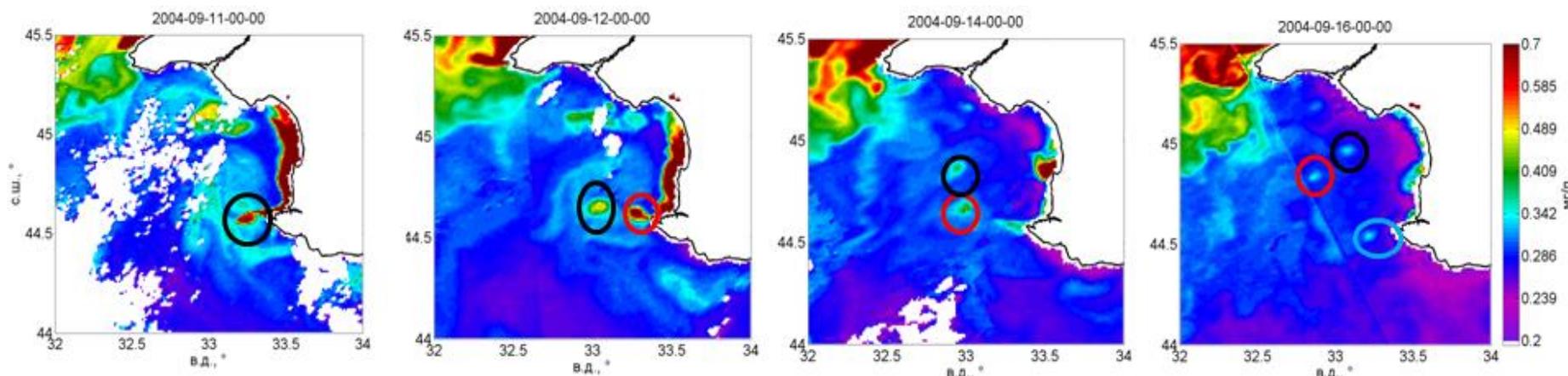


Примеры субмезомасштабных вихрей

В субмезомасштабных циклонах наблюдается аккумуляция прибрежных вод и взвесей, которые затем уносятся на большое расстояние от берега



В процессе движения концентрация Хл в вихрях уменьшается, отражая смешение с окружающими водами



MODIS, 11-16 сентября 2004 год

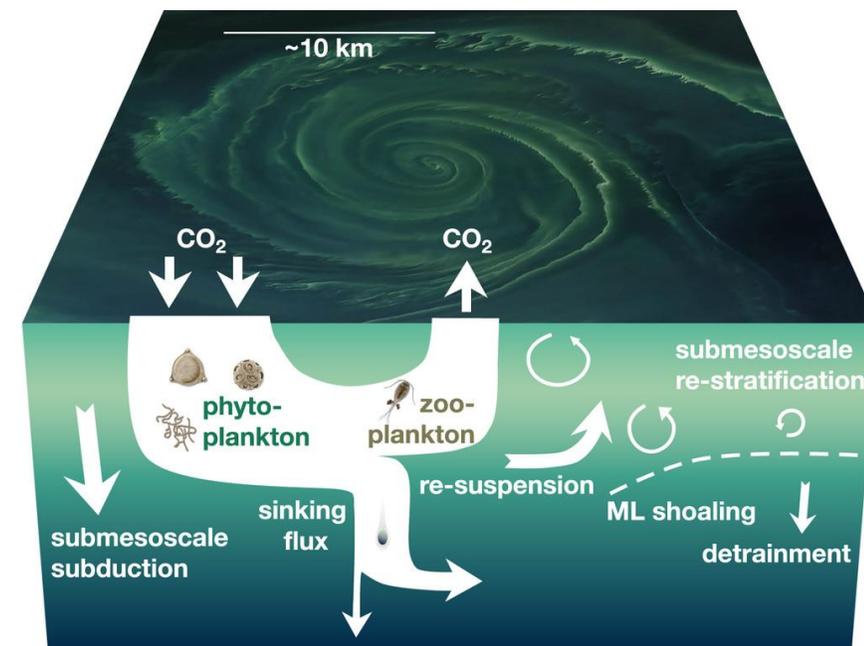
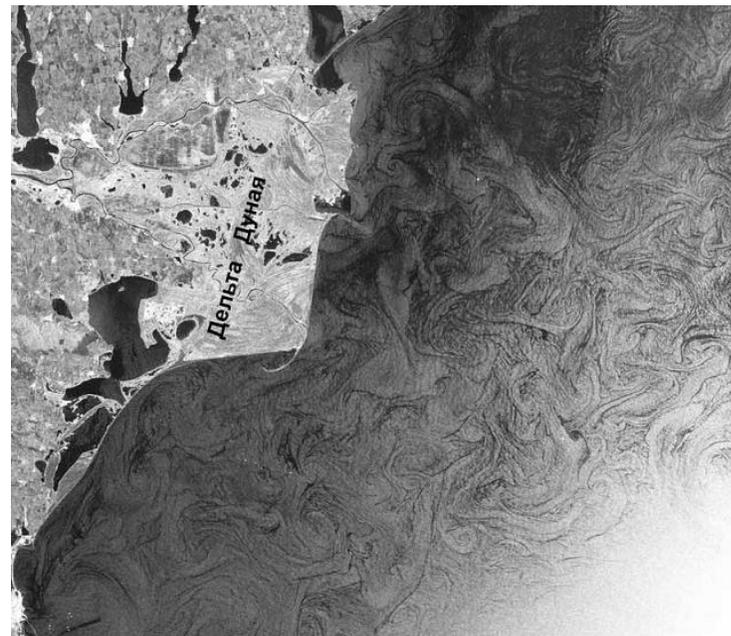
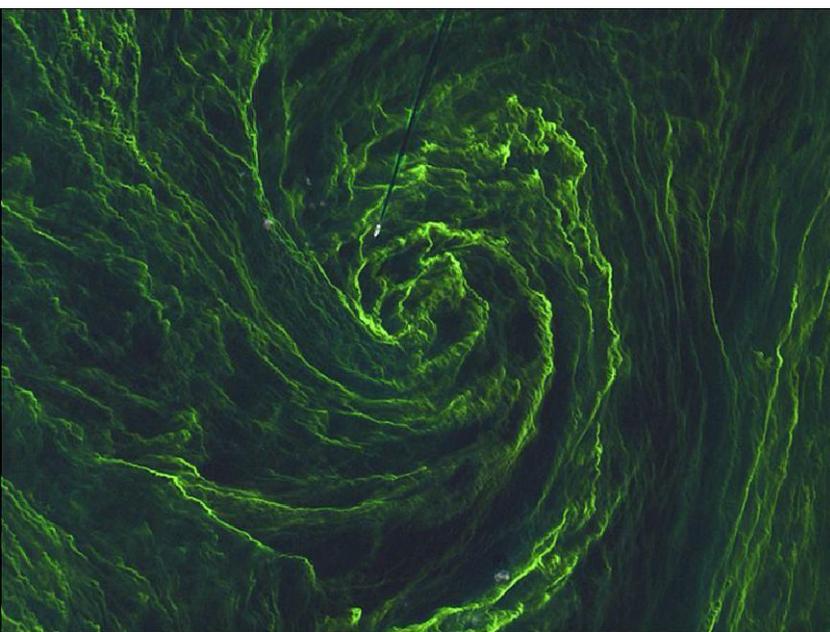


Субмезомасштабный вихрь по данным съемки БПЛА

Зоны конвергенции на фронтах течений

Зоны наиболее интенсивной конвергенции сосредоточены в районах фронтов.

В зонах конвергенции происходит скопление различных поверхностных веществ - пленок, мусора, зоопланктона



Колебания пикноклина во внутренних волнах вызывает возникновение зон дивергенции и конвергенции – модуляция волн

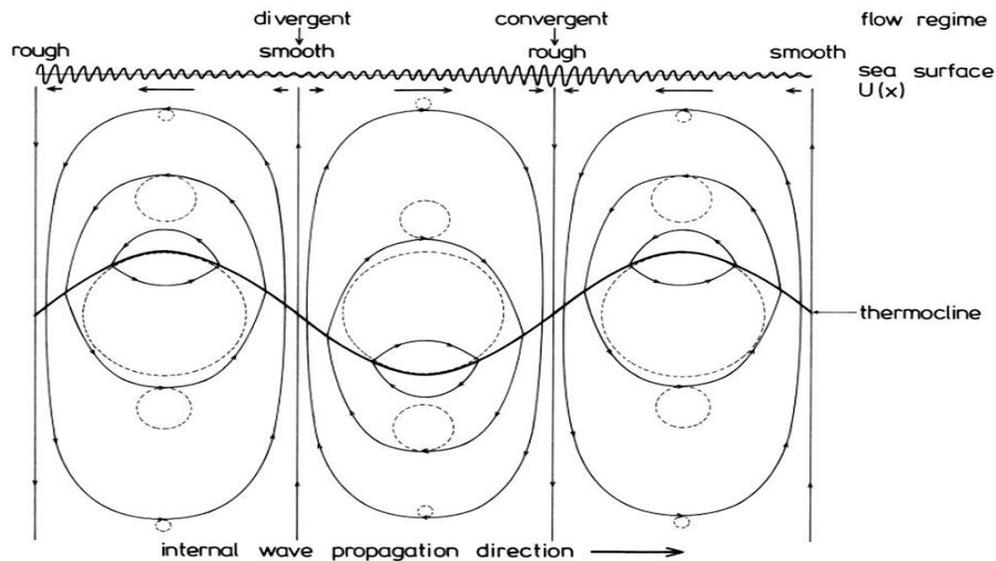
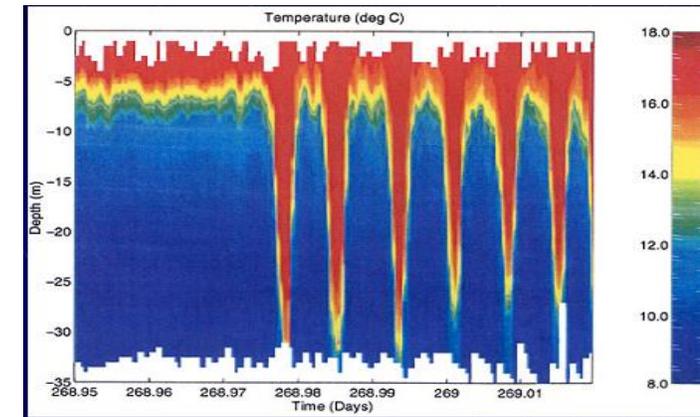
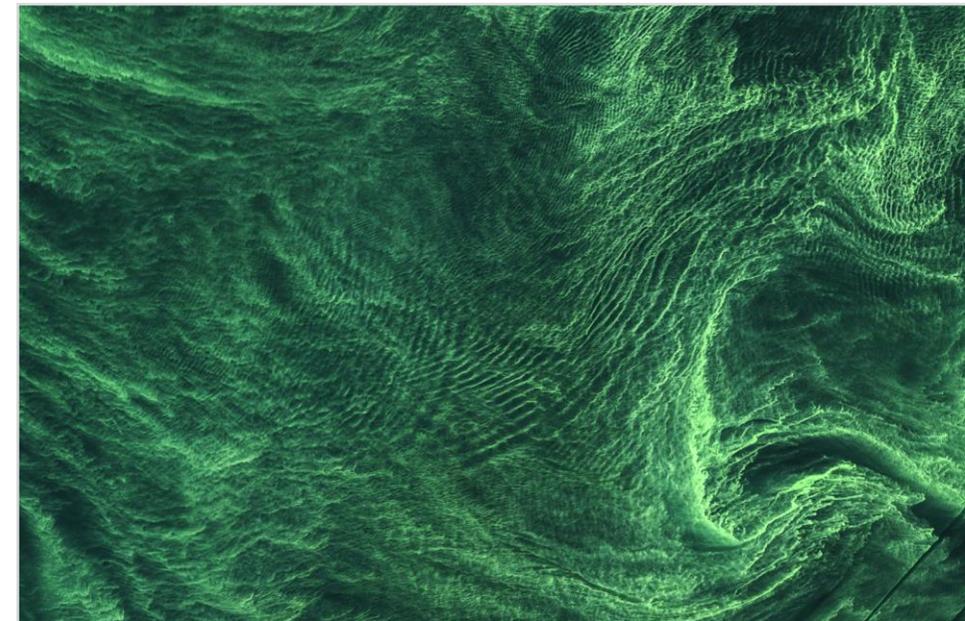


Figure 12.4. Schematic plot of processes associated with the passage of a linear oceanic internal wave. Deformation of the thermocline (heavy solid line), orbital motions of water particles (dashed lines), streamlines of the velocity field (light solid lines), surface current velocity vectors (arrows in the upper part of the image), and variation of the amplitude of Bragg waves (wavy line at the top) (after Alpers, 1985).

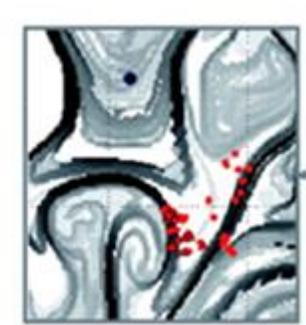
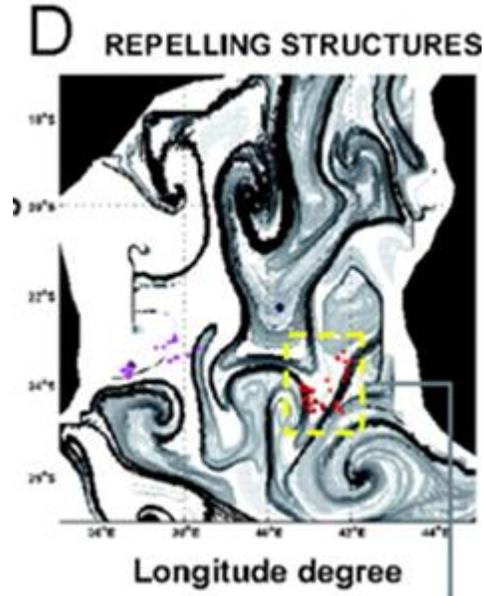


Влияние внутренних волн на скопление цианобактерий

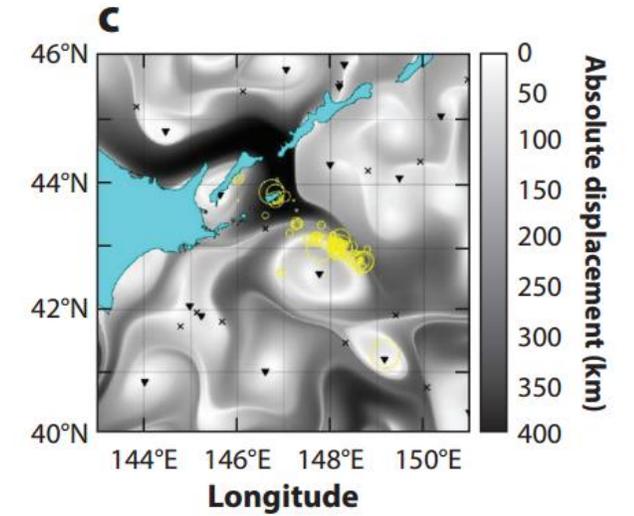


Фрегат

Максимальные выловы сардин наблюдаются в зонах конвергенции, над которыми чаще всего летают фрегаты



Полеты фрегатов и зоны конвергенции

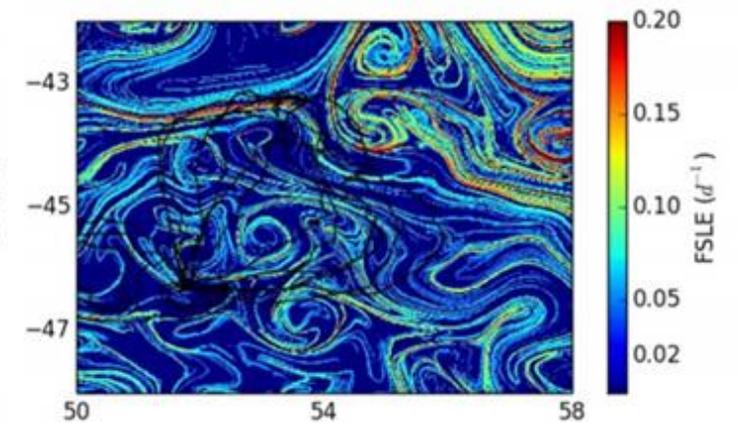
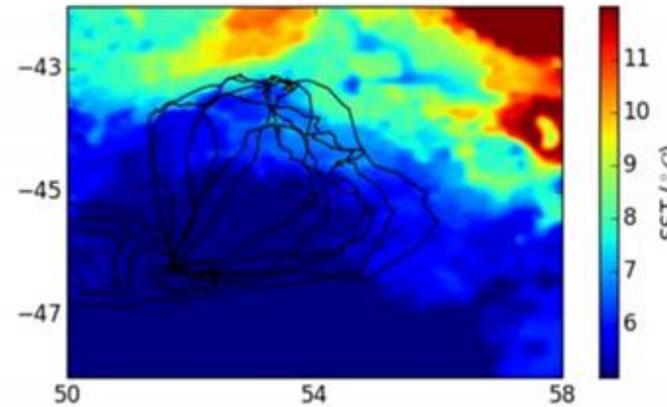


Зоны максимального вылова сардины (Prantz et al., 2018)

Пингвины доплывают до зоны конвергенции - Антарктического фронта и ловят рыбу пlying по течению



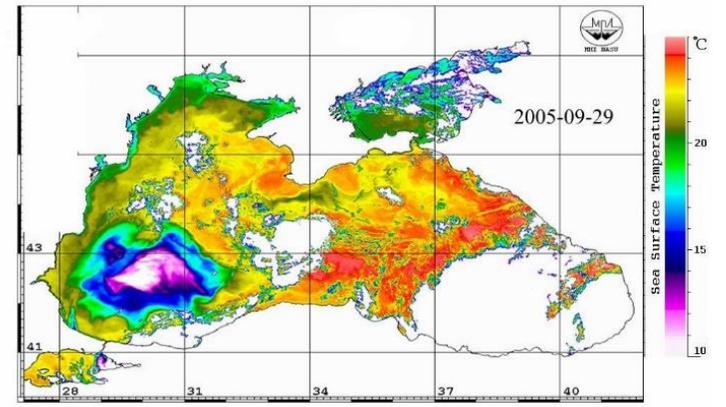
Макаронный (златовласый) ПИНГВИН



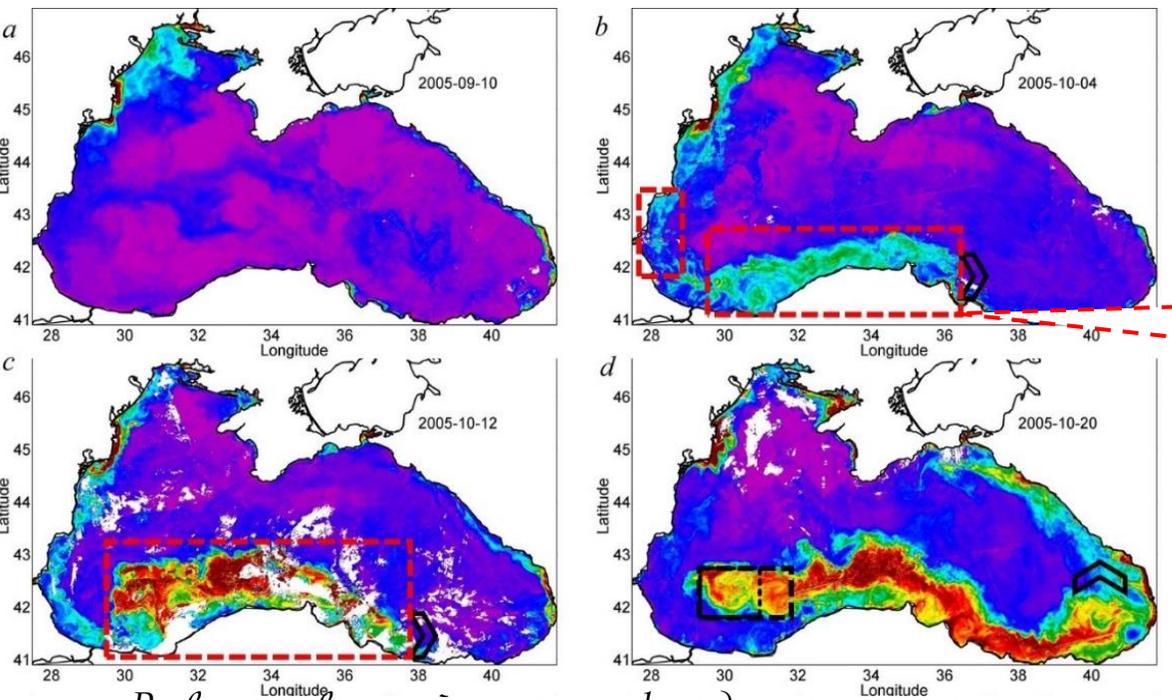
Действие аномального квазитропического циклона в сентябре 2005 г вызвало интенсивное «цветение» другого типа фитопланктона – кокколитофорид, в нехарактерное для них время



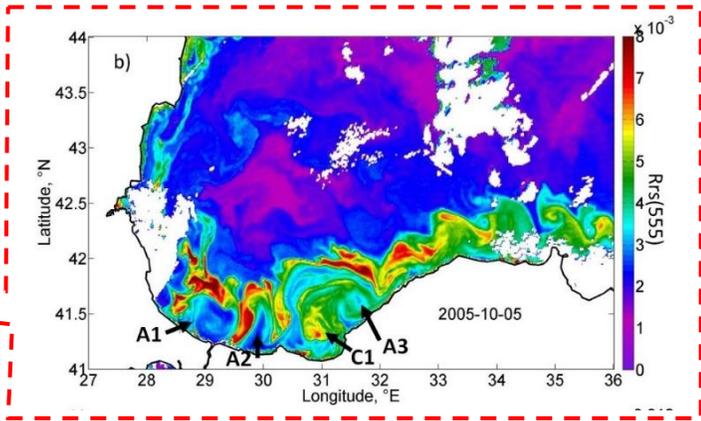
Снимок Aqua-MODIS за 27.09.2005 г. в видимом диапазоне [Worldview portal]



Температура поверхности по данным AVHRR за 29.09.2005 г.



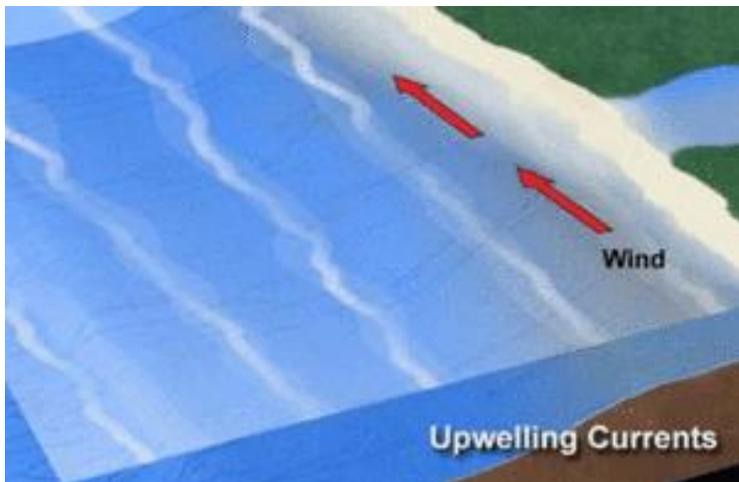
Развитие цветений кокколитофорид на картах яркости по данным Aqua-MODIS



В начальный период «цветение» наблюдалось в субмезомасштабных структурах, образованных на границе шельфовых вод

В этих структурах вертикальные скорости могут в 10-100 раз превосходить их обычные значения – их исследование становится все более актуальным

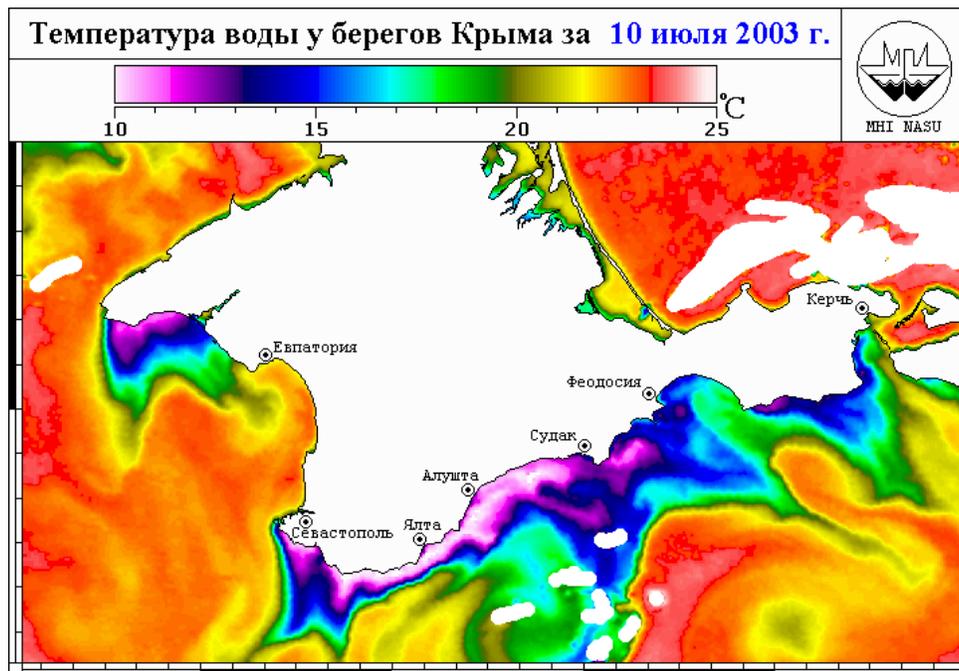
Зоны дивергенции у берега - прибрежные апвеллинги



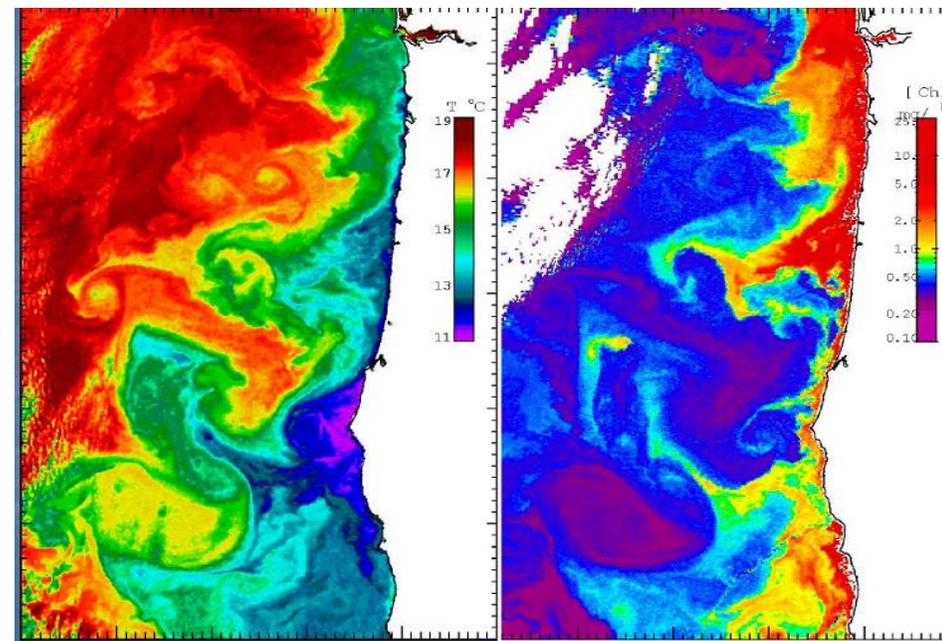
Вода течет вправо (в северном полушарии) от направления ветра из-за вращения Земли.

Если вода течет от берега то происходит дивергенция – возникает апвеллинг

Поднятые холодные воды характеризуются высокими значениями концентрации биогенов и биопродуктивности



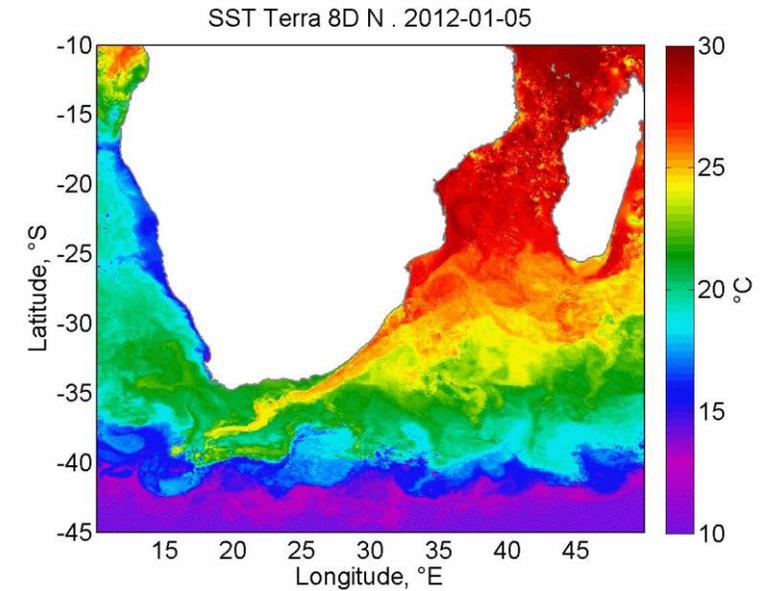
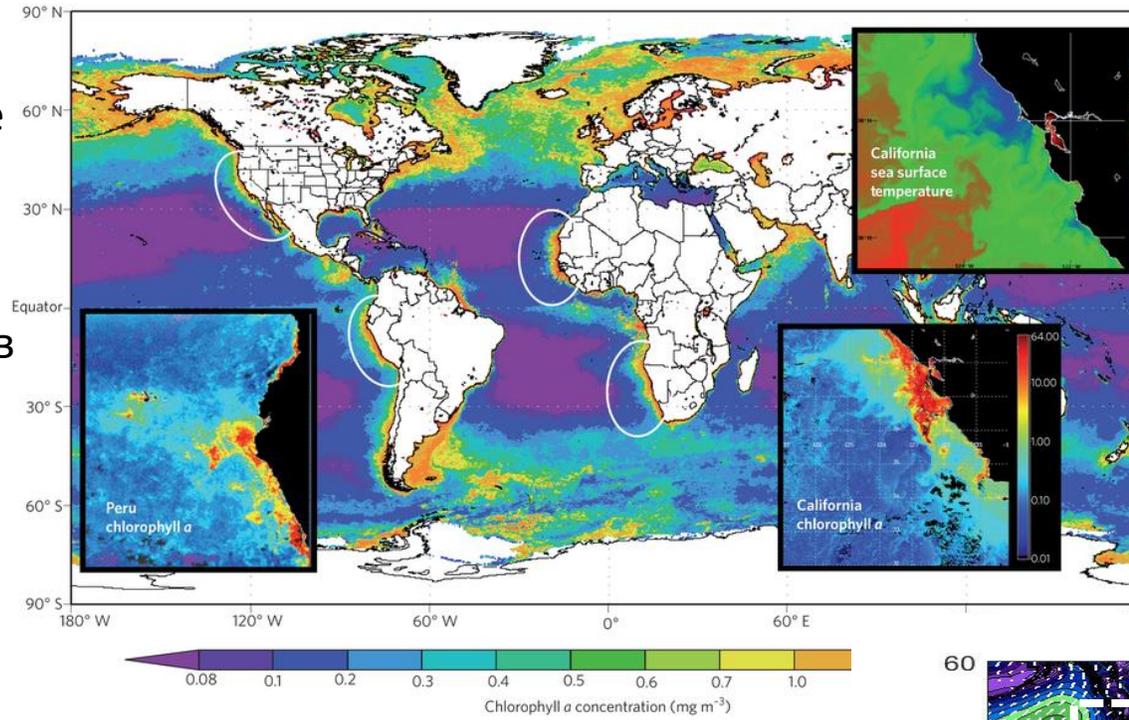
Апвеллинг в Черном море



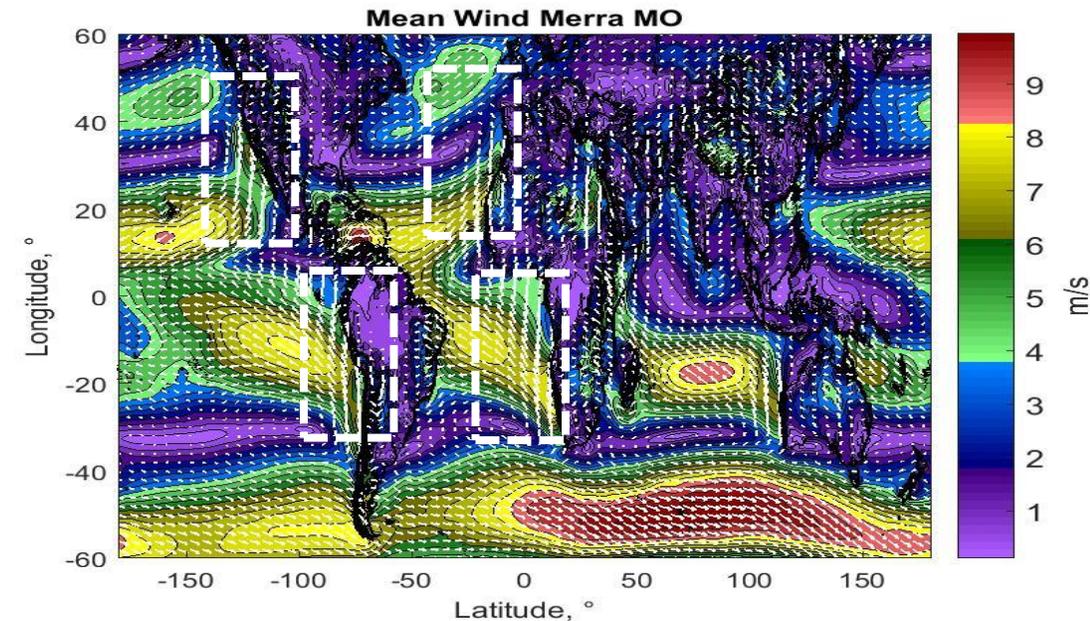
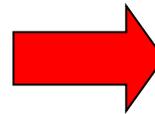
Калифорнийский апвеллинг
Температура Хлорофилл А

Восточные пограничные апвеллинги

Зоны постоянных апвеллингов – наиболее продуктивные воды Мирового океана сосредоточены на восточной части океанов

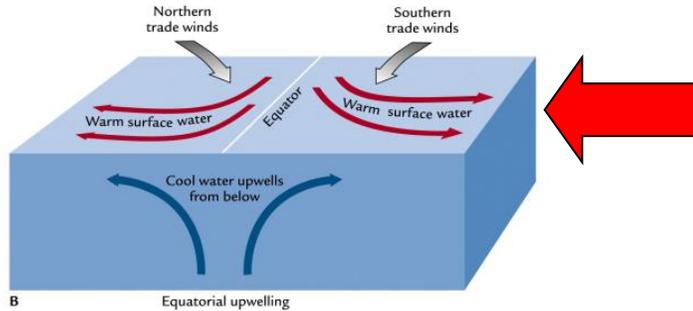


Зоны постоянных апвеллингов вызваны вдольбереговыми ветрами в восточной части субтропических антициклонов в атмосфере



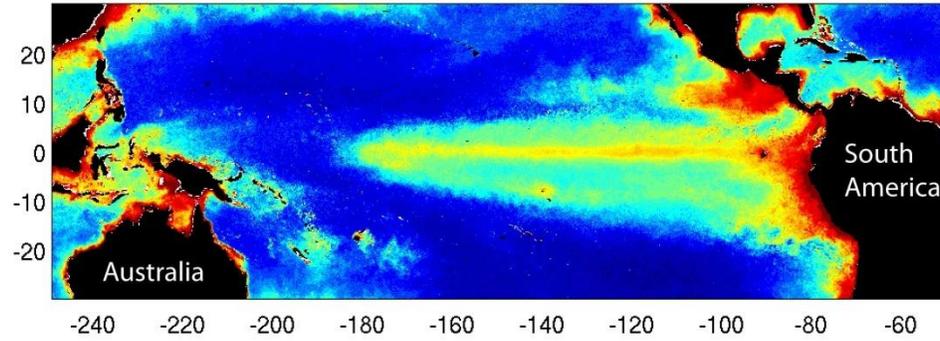
Карта средней скорости ветра

Экваториальные апвеллинги

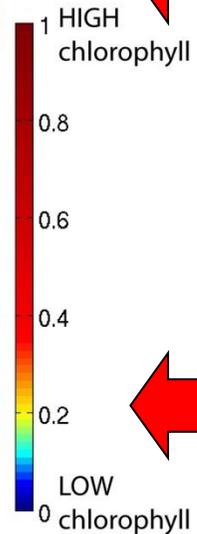
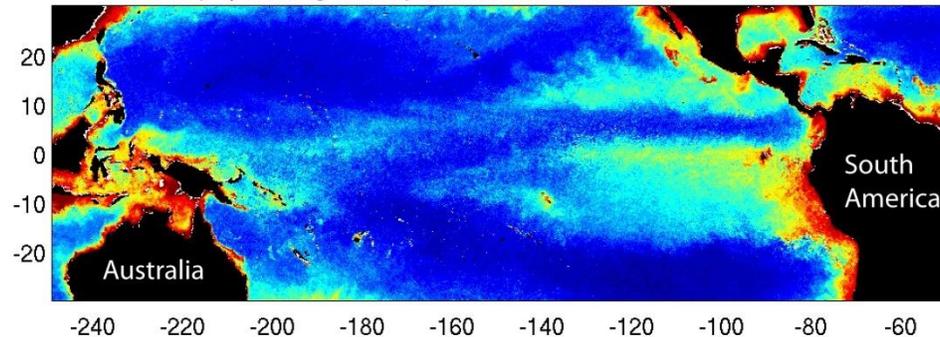


На экваторе из-за смены знака вращения и действия пассатных ветров возникают мощные экваториальные апвеллинги

Chlorophyll along the equator in the Pacific in NORMAL conditions



Chlorophyll along the equator in the Pacific in EL NINO conditions



Средняя концентрация хлорофилла в Тихом океане

В период Эль-Ниньо пассаты ослабевают и апвеллинг затухает – падение продуктивности вод

Крупномасштабные круговороты и распределение биогенов

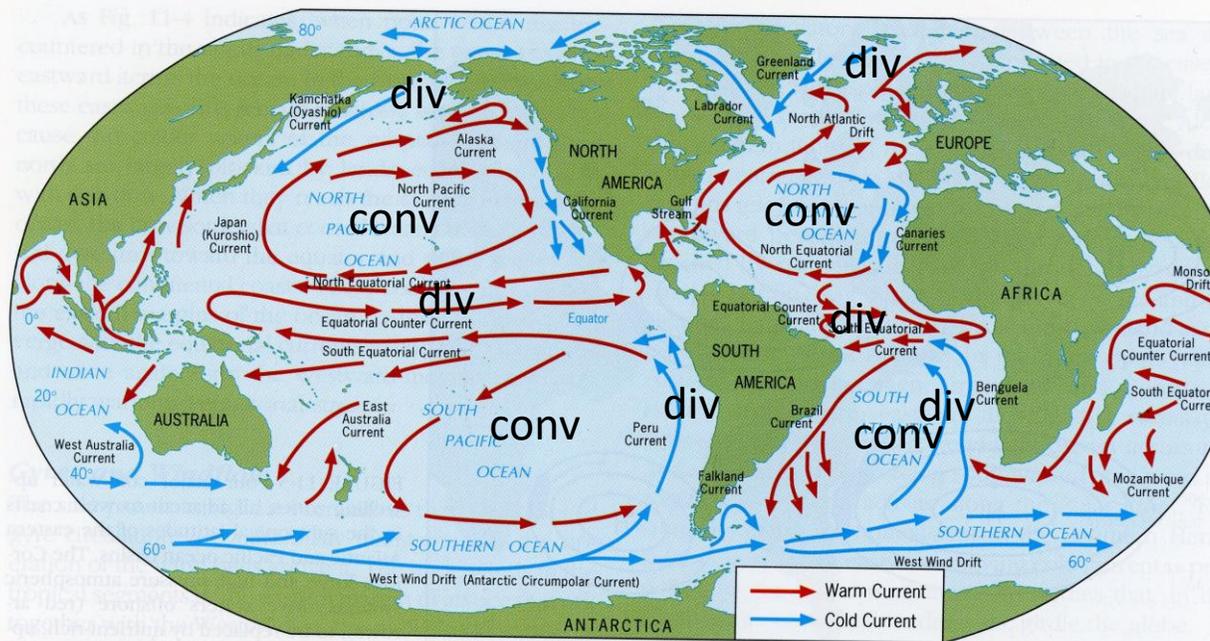
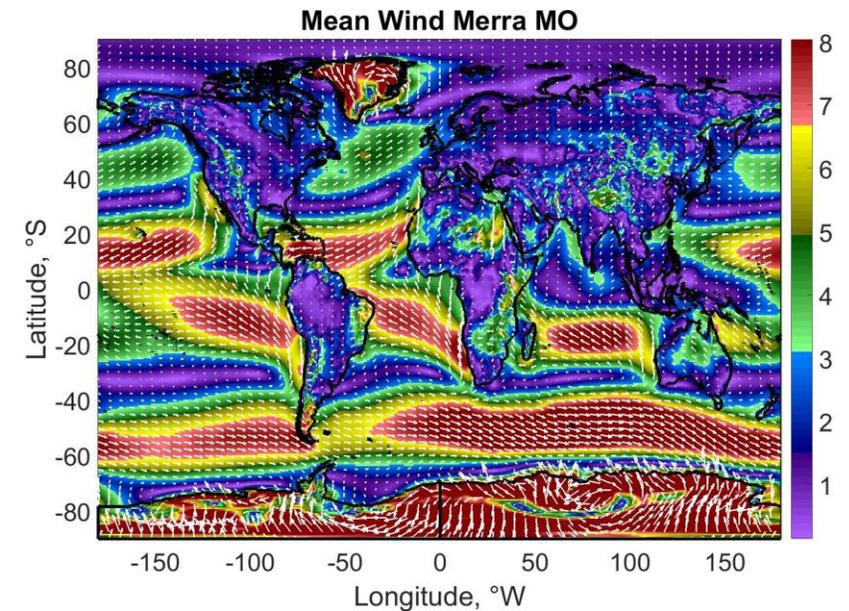


FIGURE 11-6 World distribution of ocean currents, showing average positions and relative temperatures in each of the ocean basins.

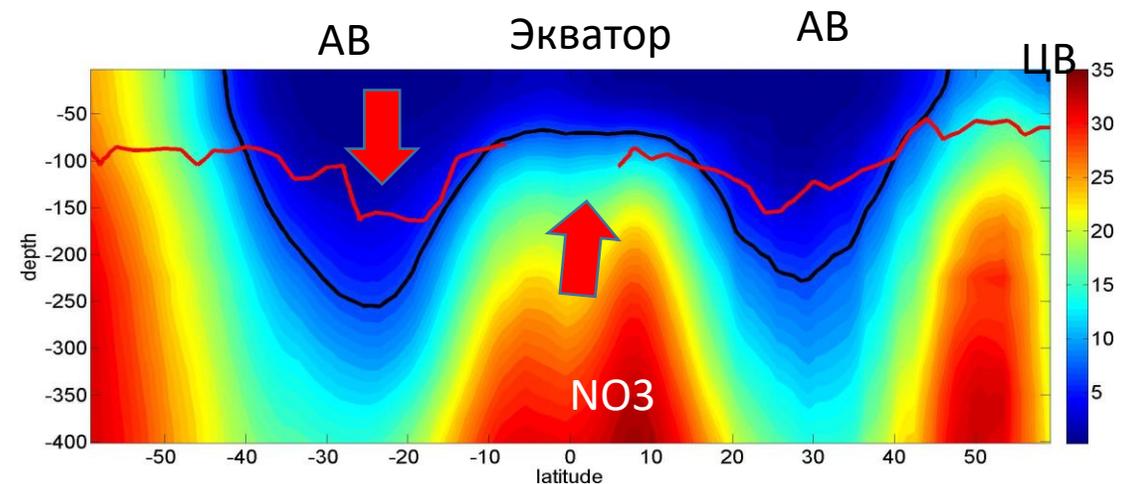
Крупномасштабные круговороты в океане определяют положение глубины подповерхностного максимума биогенов и Хл

div

ЦВ

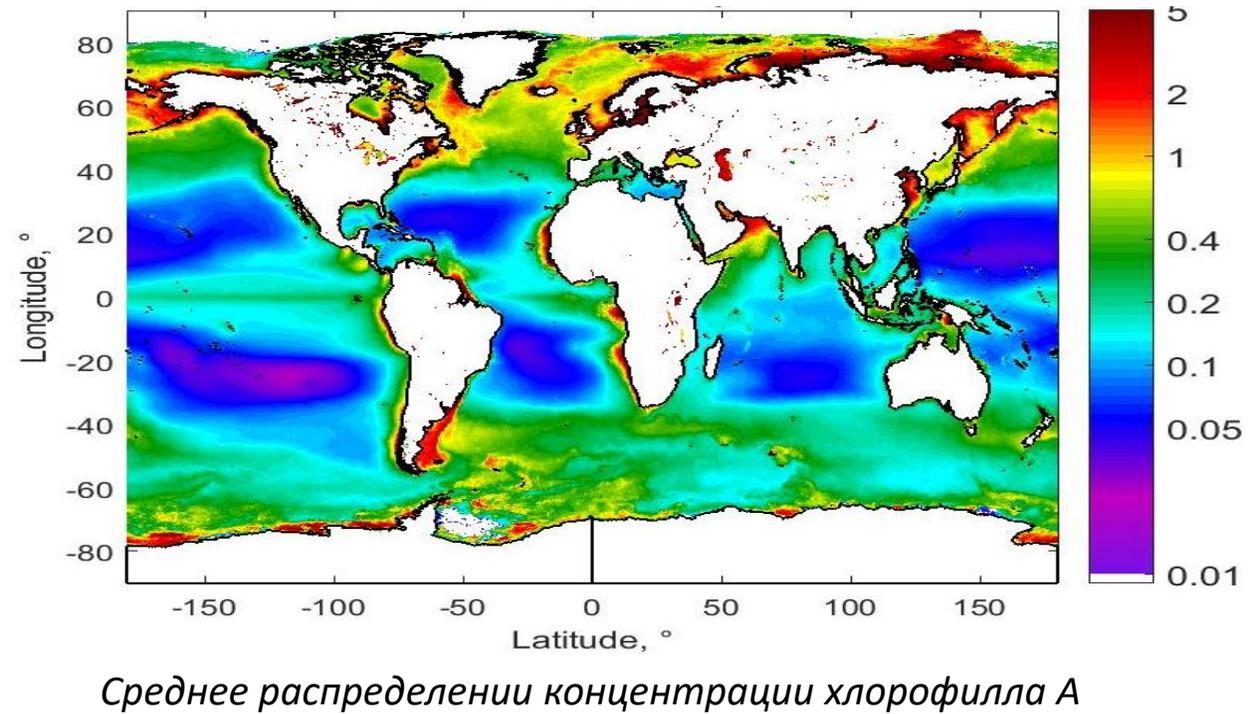
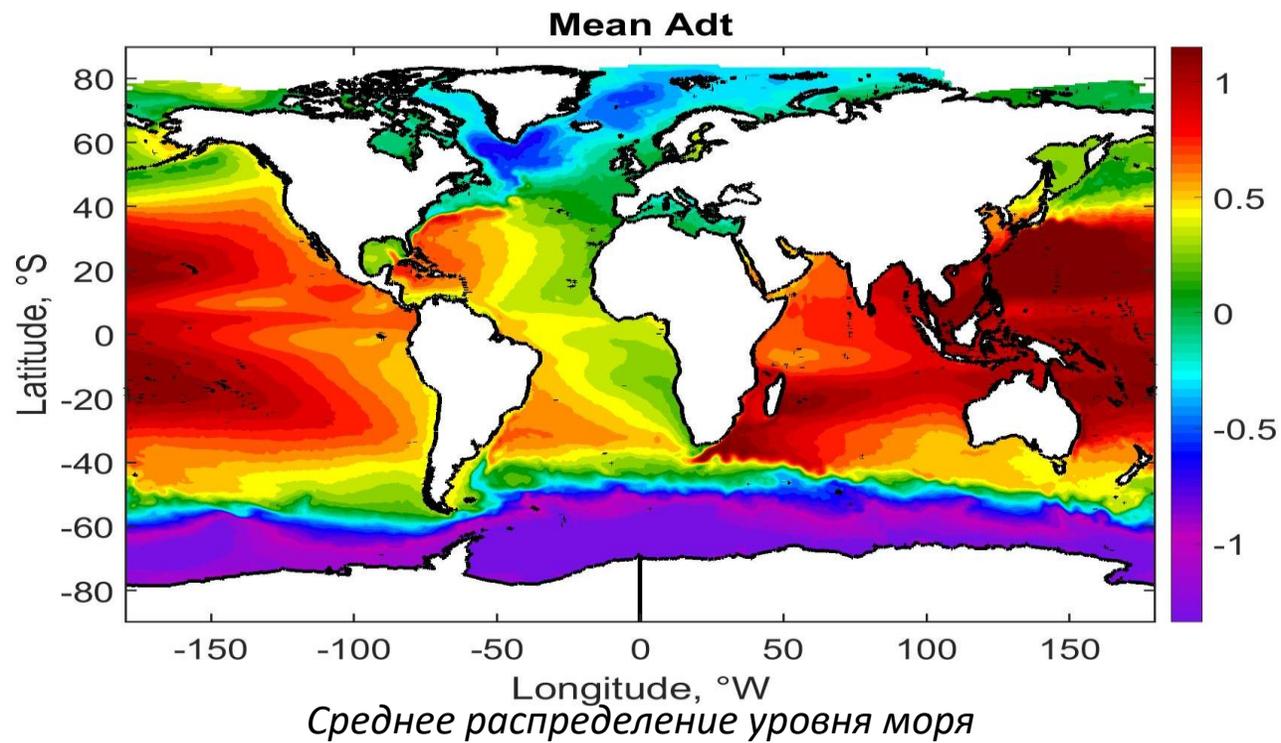


Скорость ветра

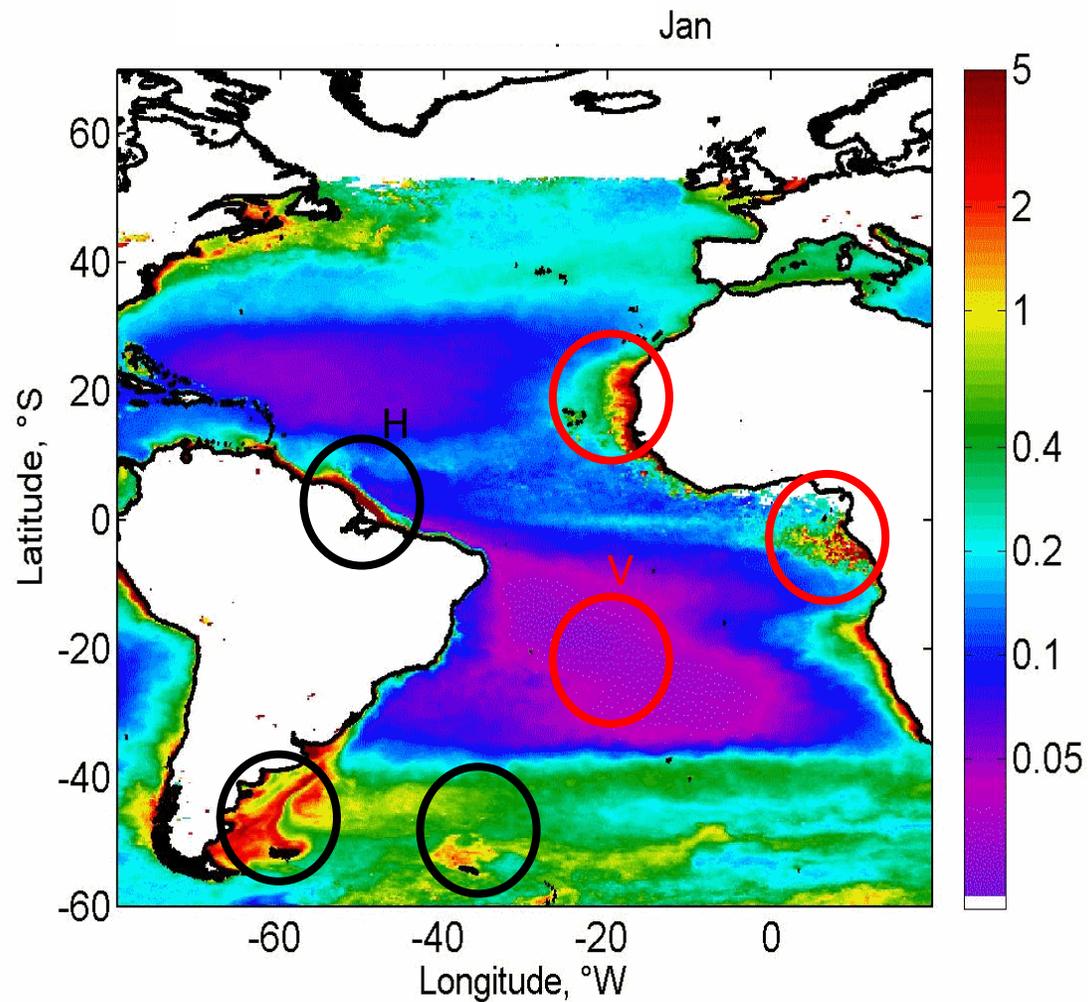


Широтное распределение нитратов, красная линия изолюма $\mu\text{mole photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$

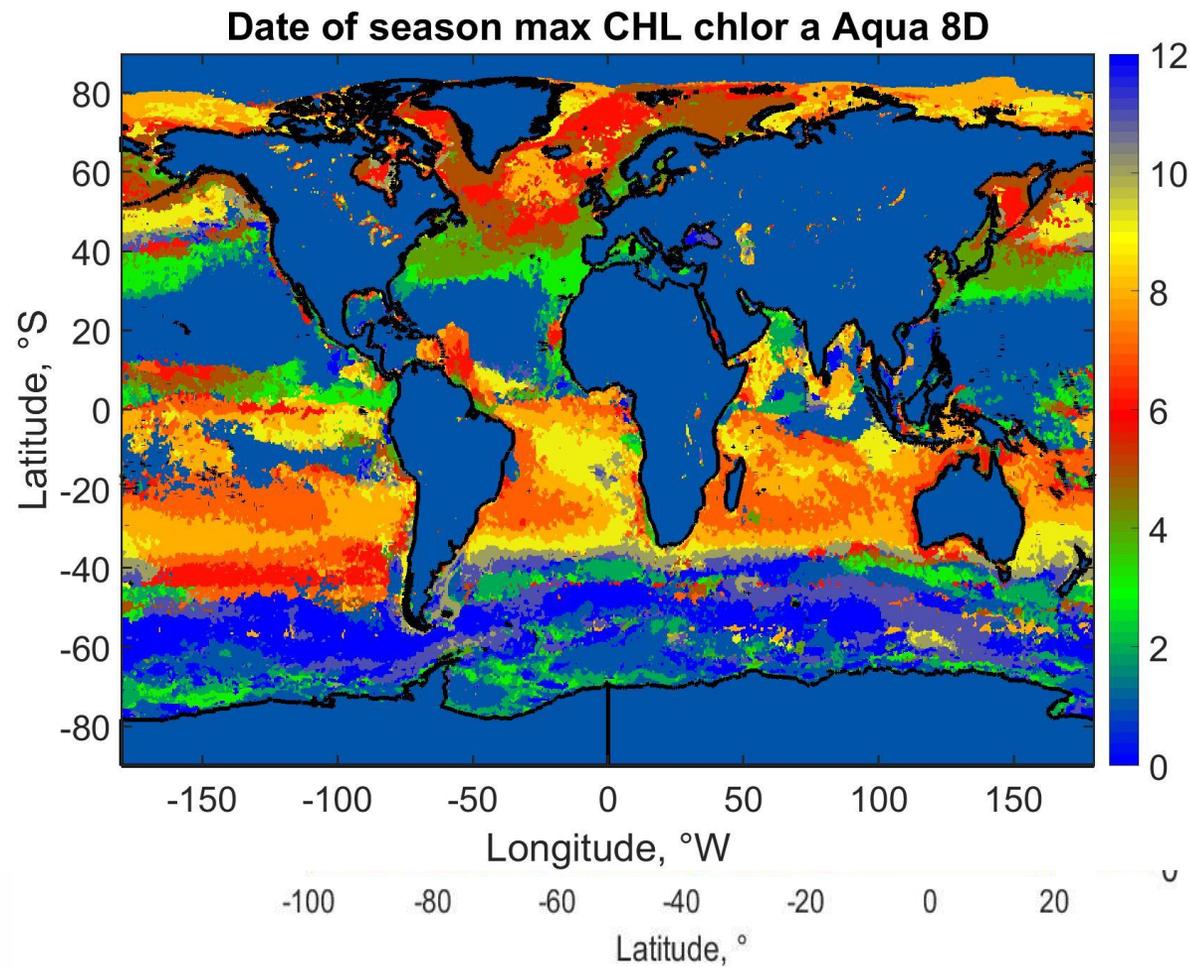
Глобальное распределение уровня моря и концентрации хлорофилла А



Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла А - перемешивание

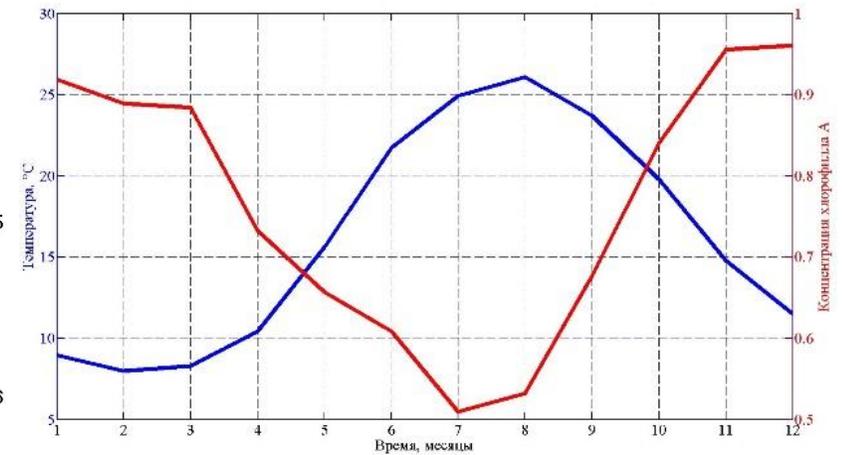
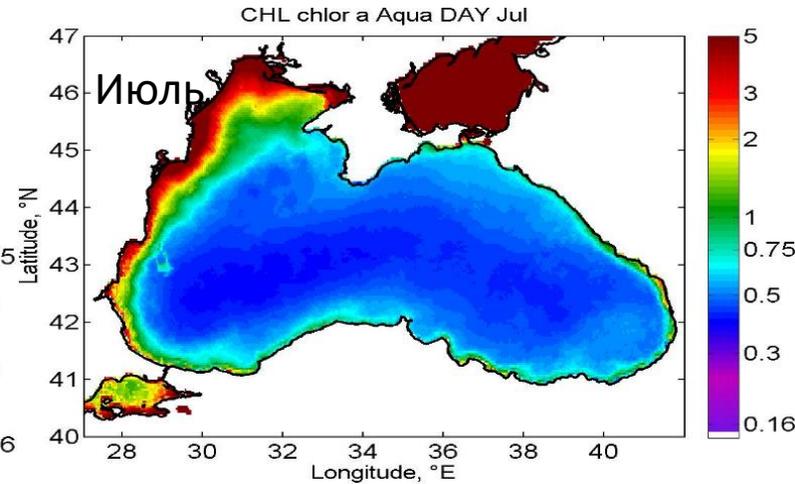
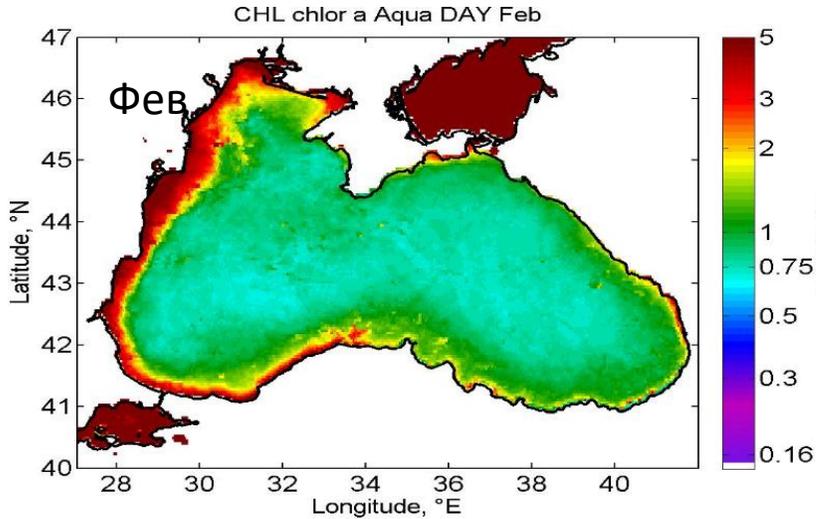


Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла А в Атлантике



Время максимума цветения хлорофилла А в месяцах

Влияние зимней конвекции на цветение фитопланктона



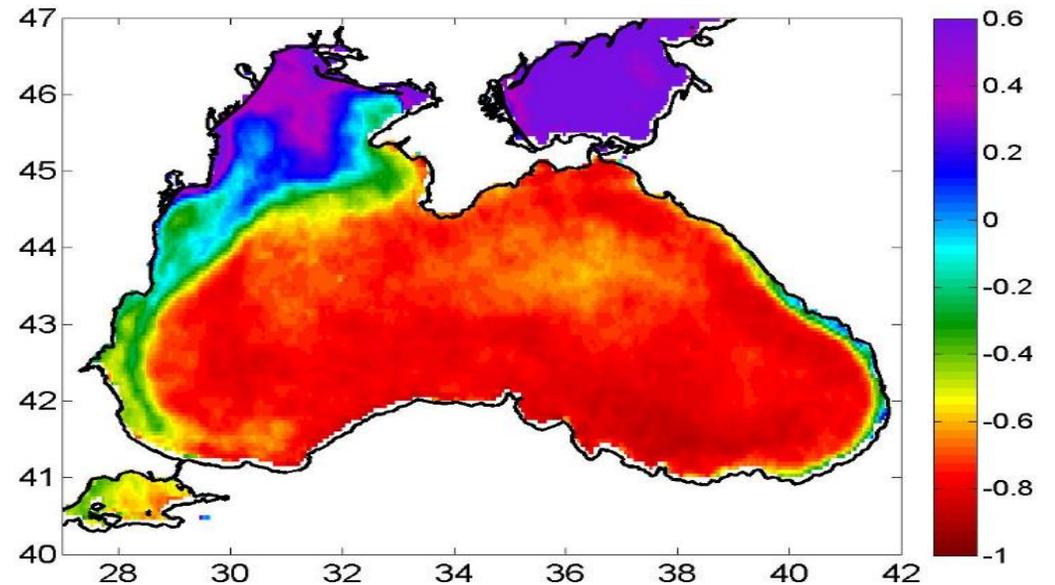
Концентрация хлорофилла А в зимний и летний период по данным MODIS

Сезонный ход температуры и Хл

Важнейшая причина вертикального обмена – **зимняя конвекция:**

Воды выхолаживаются на поверхности и становятся тяжелее -> происходит перемешивание

Пик Хл на поверхности в глубоководной части моря приходится на декабрь-январь, когда начинается интенсивная зимняя конвекция (Nezlin et al., 2007; Финенко и др., 2008, 2012)



Карта корреляции между концентрацией хлорофилла А и средней по морю температуры поверхности

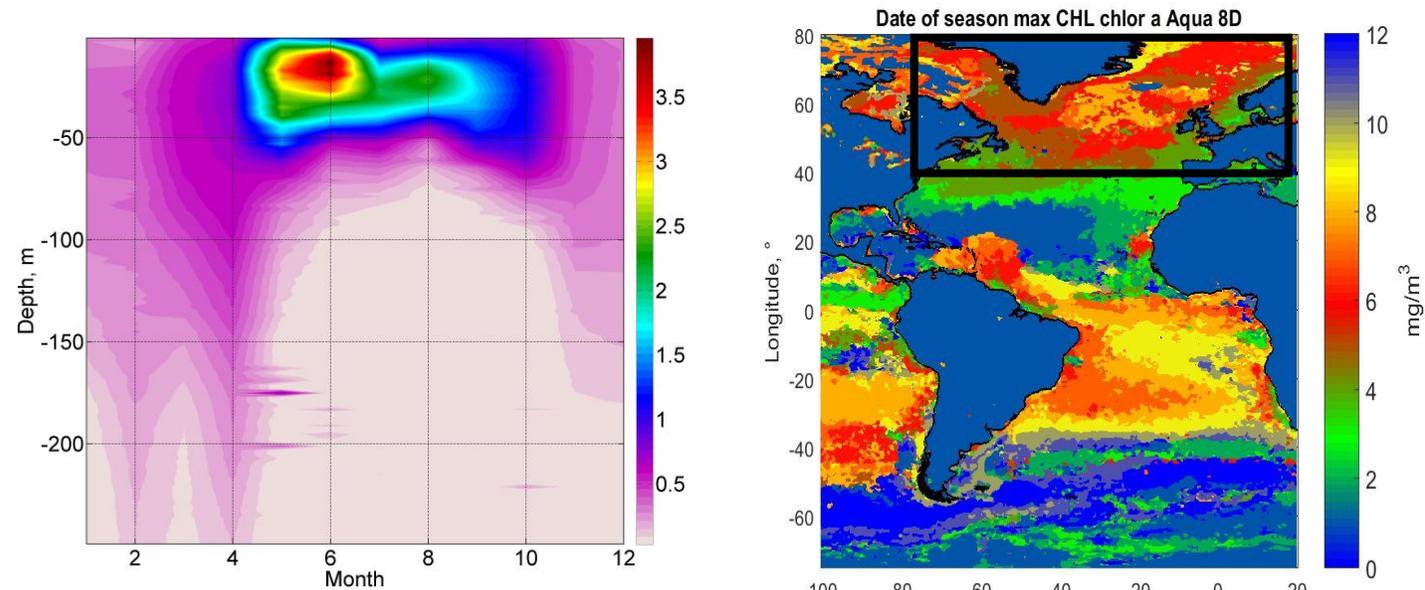
Весеннее цветение фитопланктона – роль термической стратификации

В высоких широтах максимум Хл наблюдается после зимы в весенний период

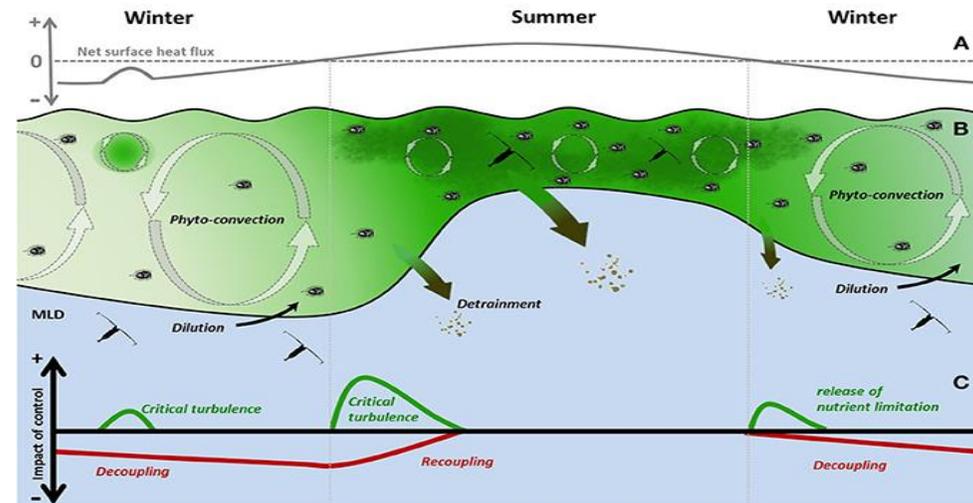
Фитопланктон в процессе движения должен находиться в фотической зоне достаточное время для дыхания, тогда возможно цветение (Sverdrup, 1954).

В высоких широтах глубины перемешивания достигают сотен метров и фитопланктону не хватает света, поэтому зимой Хл резко падает

При начале потепления и стратификации вод, которое останавливает перемешивание, происходит интенсивное цветение фитопланктона



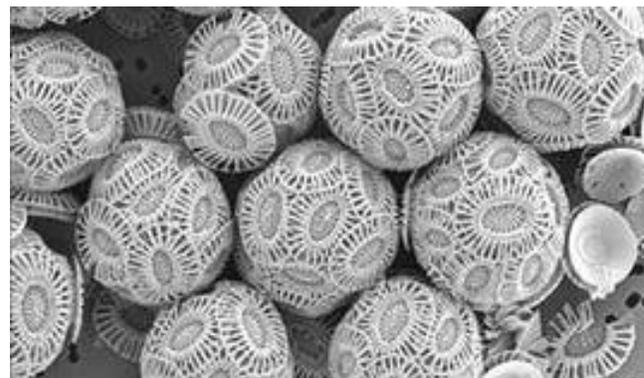
Сезонные изменения вертикального распределения Хл в Северной Атлантике



Зимняя конвекция и летние цветения кокколитофорид

Кокколитофориды вызывают резкое увеличение яркости из-за известняковых (CaCO_3) чешуек – кокколит вызывающие сильное обратное рассеяние света

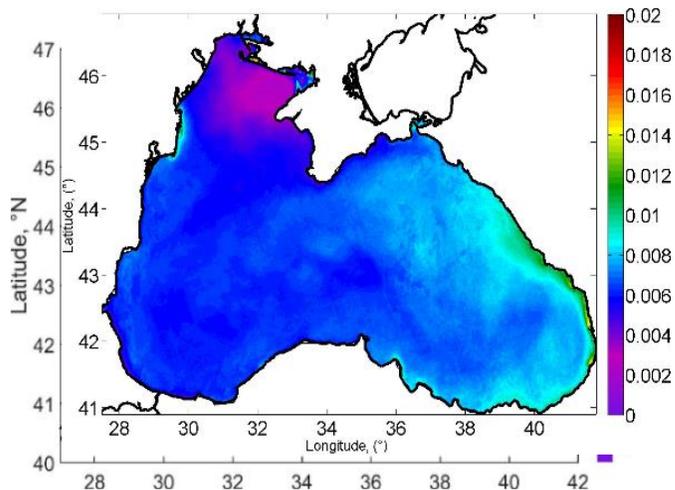
В Черном море наблюдаются одни из сильнейших летних цветений кокколитофорид, а в последнее время фиксируются рекордные цветения (2012, 2017) за спутниковую эру.



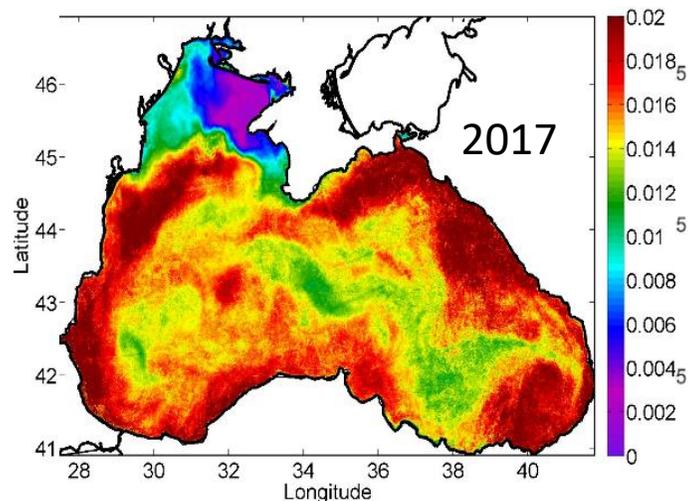
Кокколитофориды *E. huxleyi*



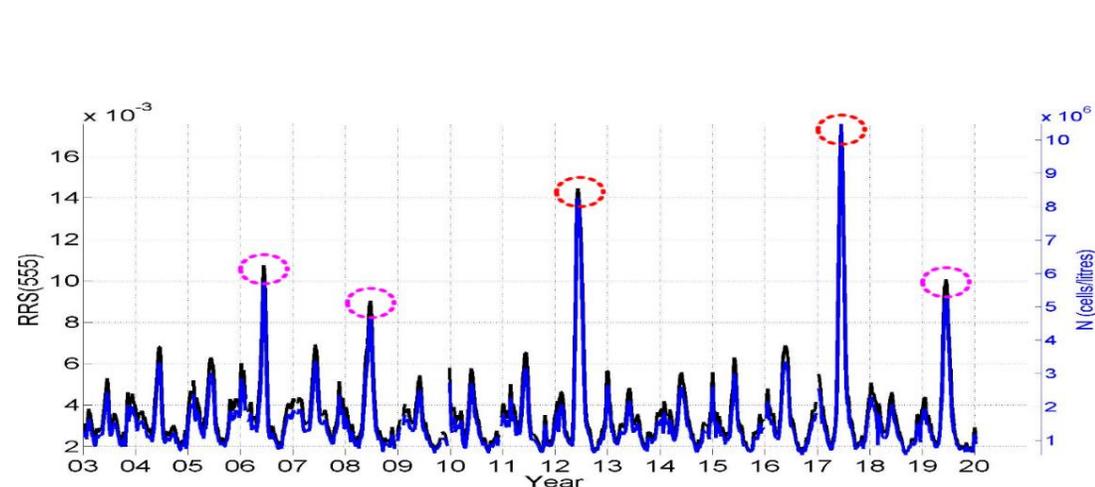
Черное море во время летнего цветения кокколитофорид



Средняя $RRS(555 \text{ нм})$ в июне 2003-2017 гг

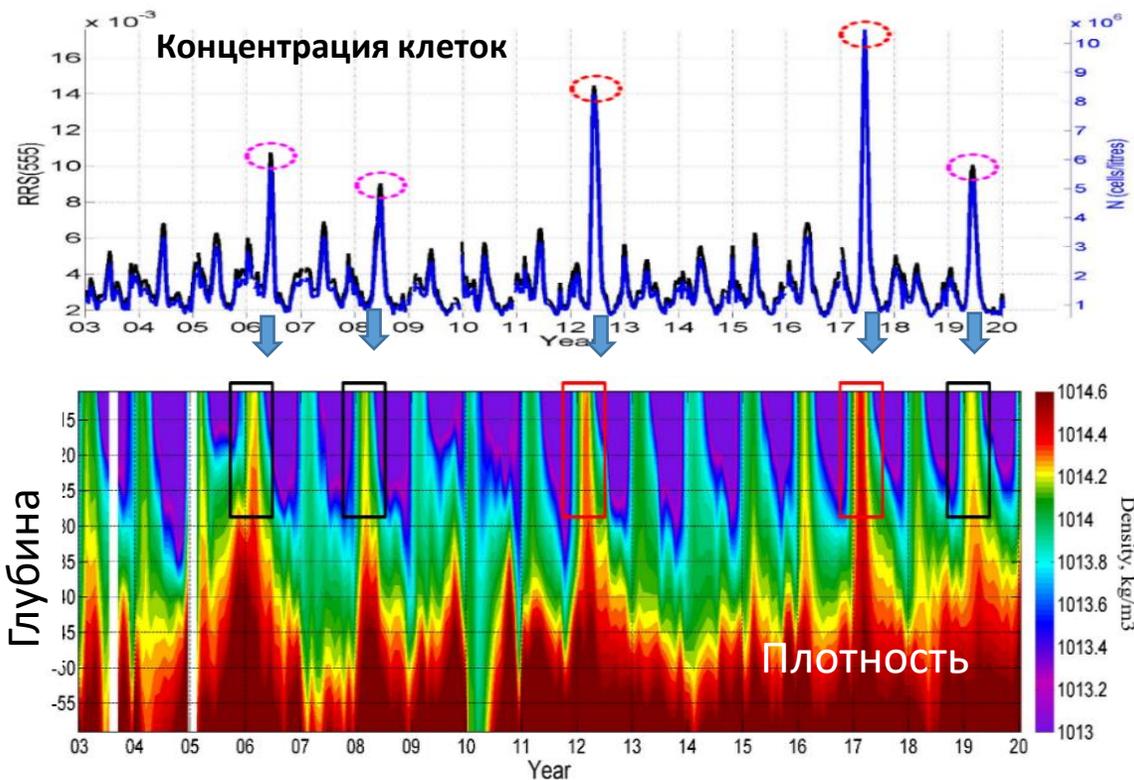


$RRS(555 \text{ нм})$ в июне 2017 г



Аномально сильные цветения кокколитофорид

Влияние солёности на изменение интенсивности конвективного вовлечения

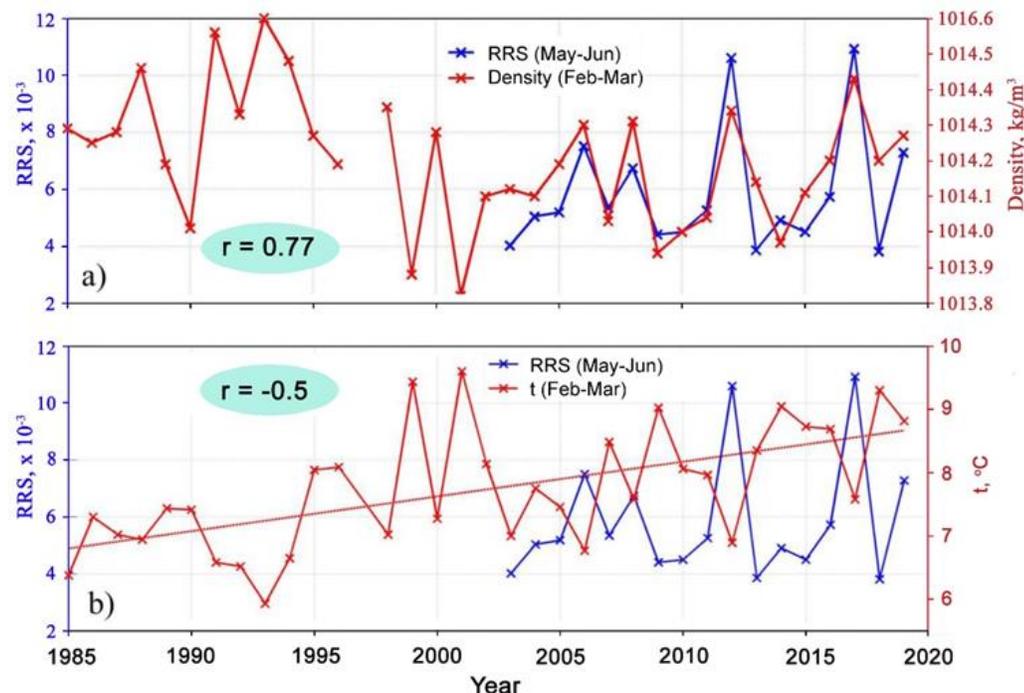


Причина аномальных летних цветений кокколитофорид в июне – выклинивание плотных вод в предыдущий зимний период – в результате конвекции

Глобальное потепление вызывает долговременный рост температуры – ослабление термической конвекции.

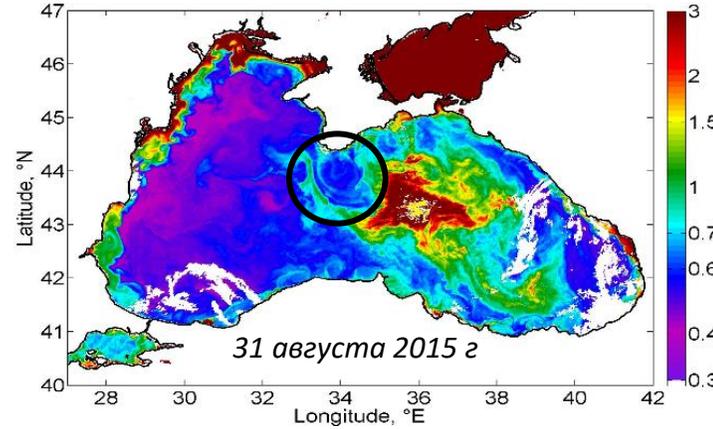
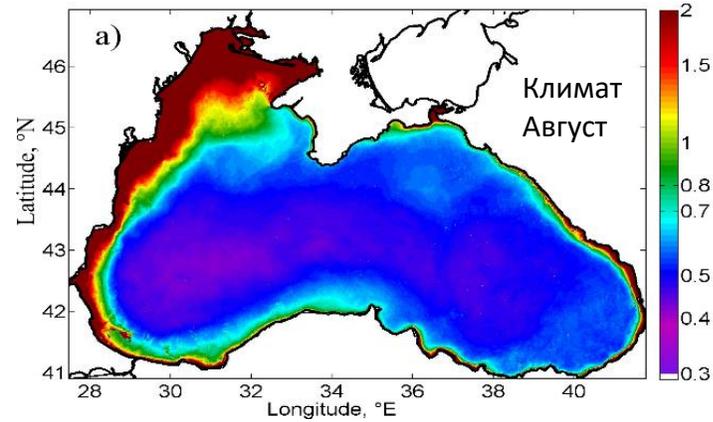
Несмотря на потепление, цветения кокколитофорид усиливаются, что связано с ростом солёности и уменьшением халинной стратификации в последние годы.

Наблюдающиеся изменения солёности вод могут существенно влиять на биопродуктивность

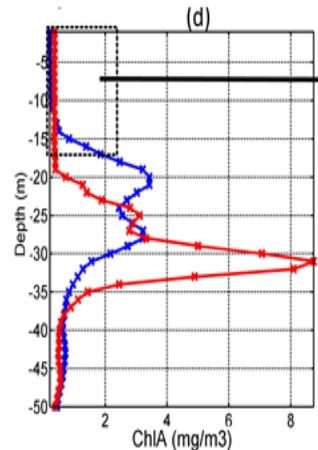


Теплый период года - штормовое воздействие

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



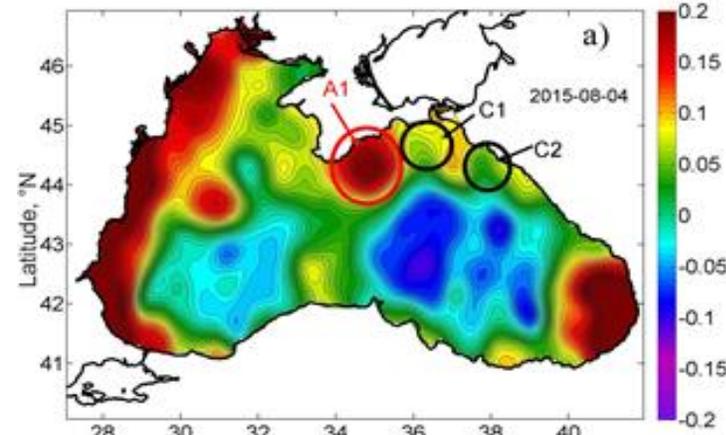
Климат Хл в августе (слева) и 31 августа 2015 г. (справа)



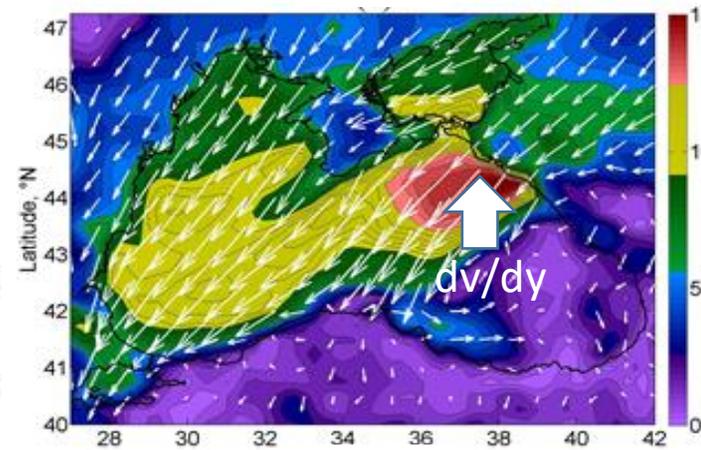
Профиль Хл до и после шторма

Физические факторы, влияющие на развитие цветений:

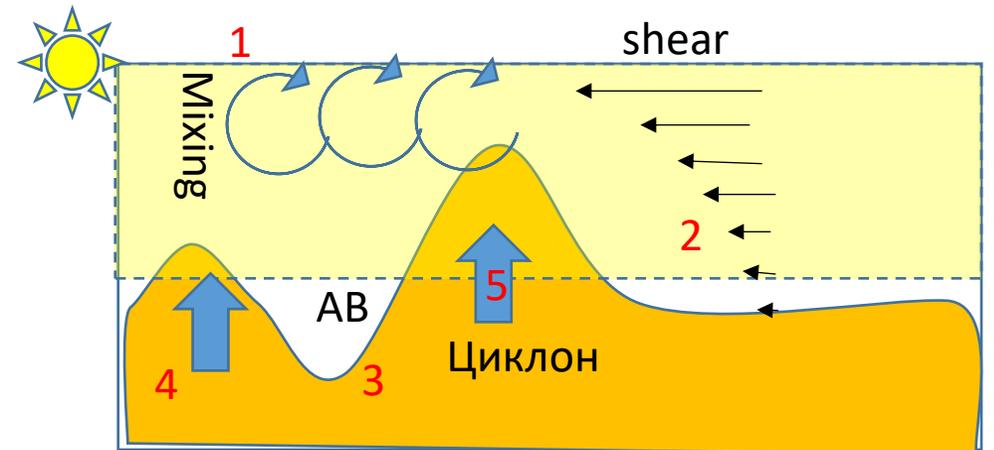
1. Ветровое турбулентное перемешивание
2. Сдвиг инерционных течений
3. Экмановский апвеллинг
4. Динамическая топография – положение нутриклина
5. Интегральное влияние завихренности ветра



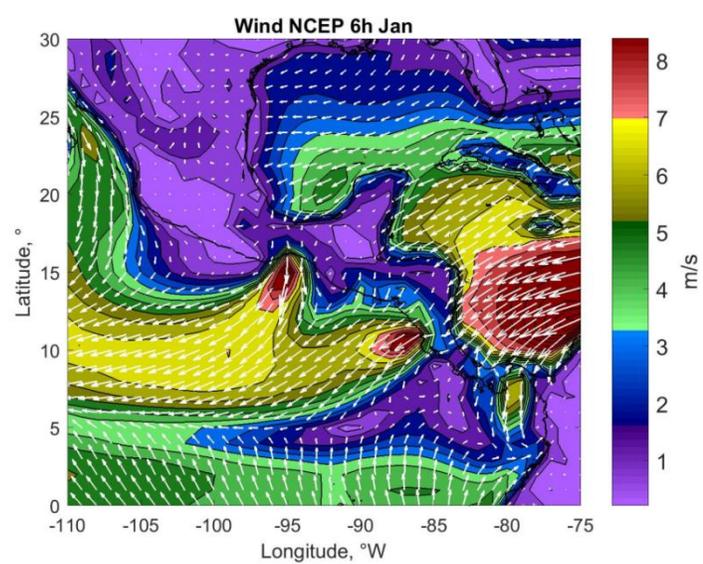
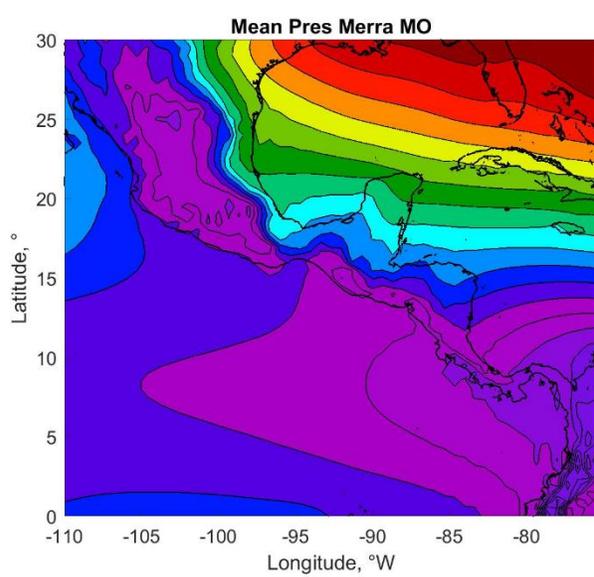
Уровень моря по данным спутниковой альтиметрии



Скорость ветра

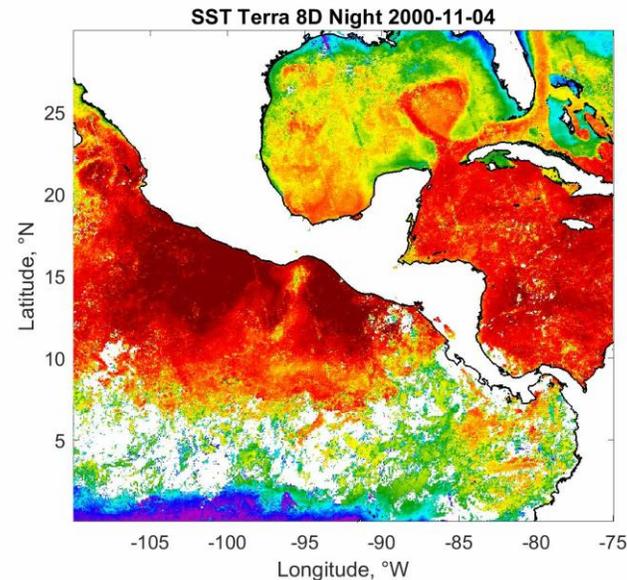


Техуано - Долинные ветра между Атлантикой и Тихим океаном

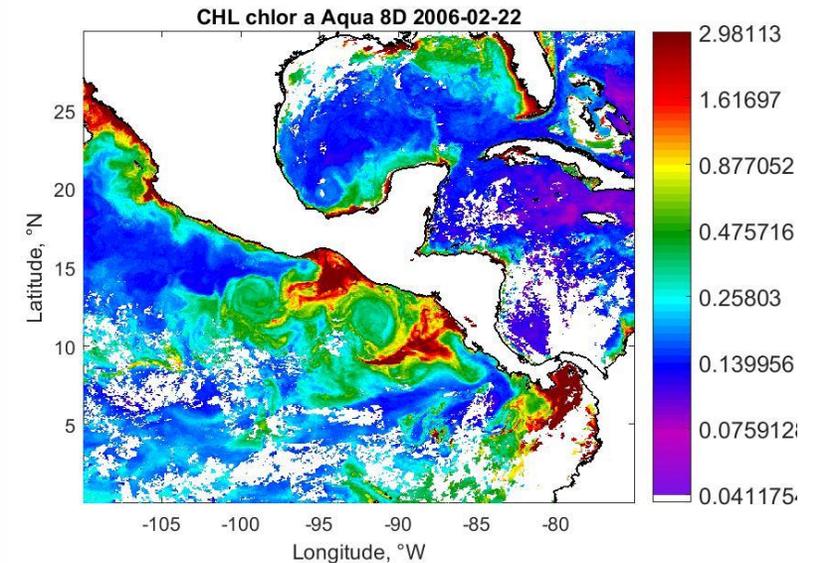


Из-за разницы давлений между Тихим и Атлантическим океаном в промежутках между гор возникают мощные долинные ветра

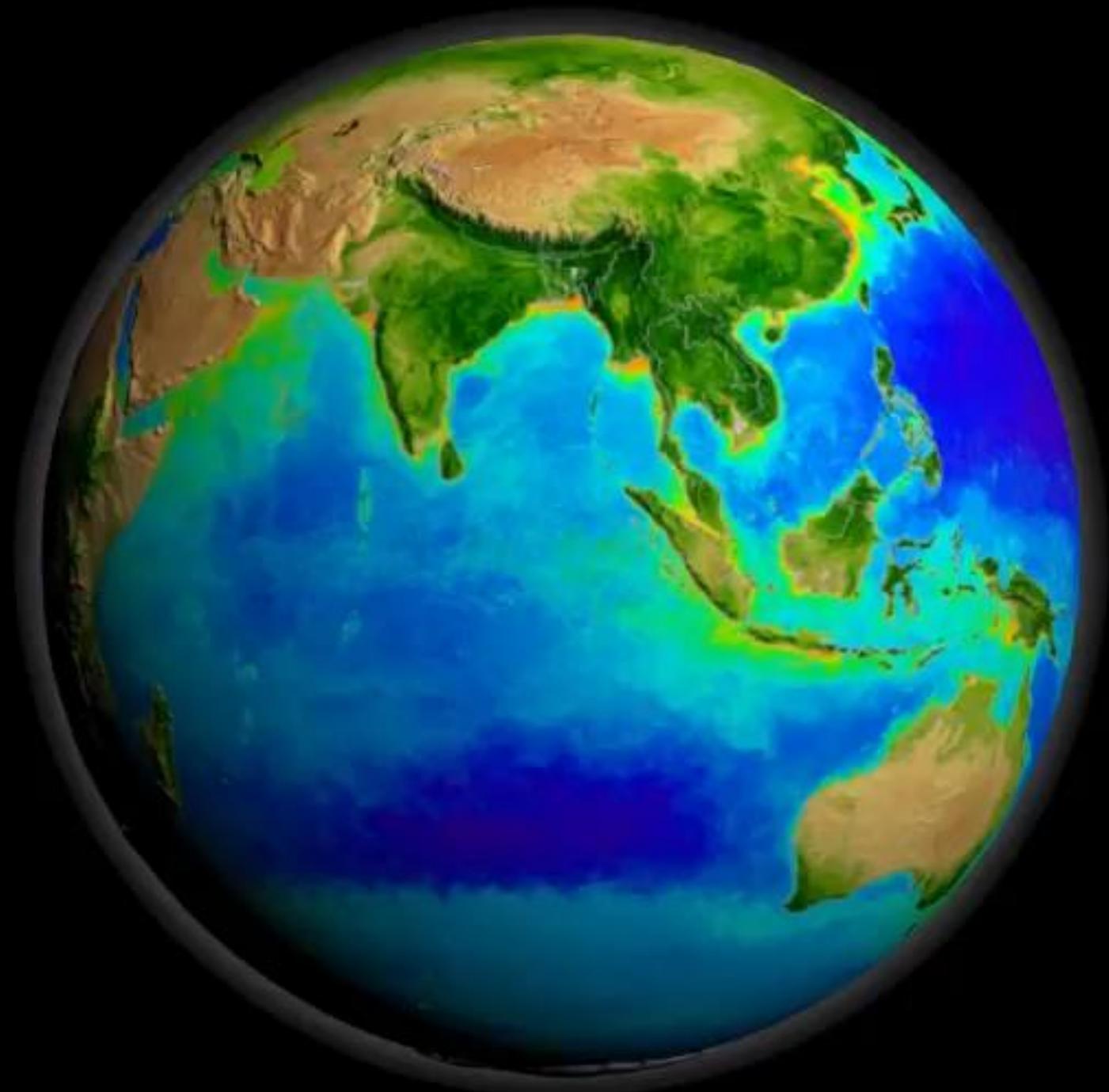
Ветровое перемешивание способствует вовлечению биогенов в верхние слои океана и вызывает резкое цветение фитопланктона



Температура океана



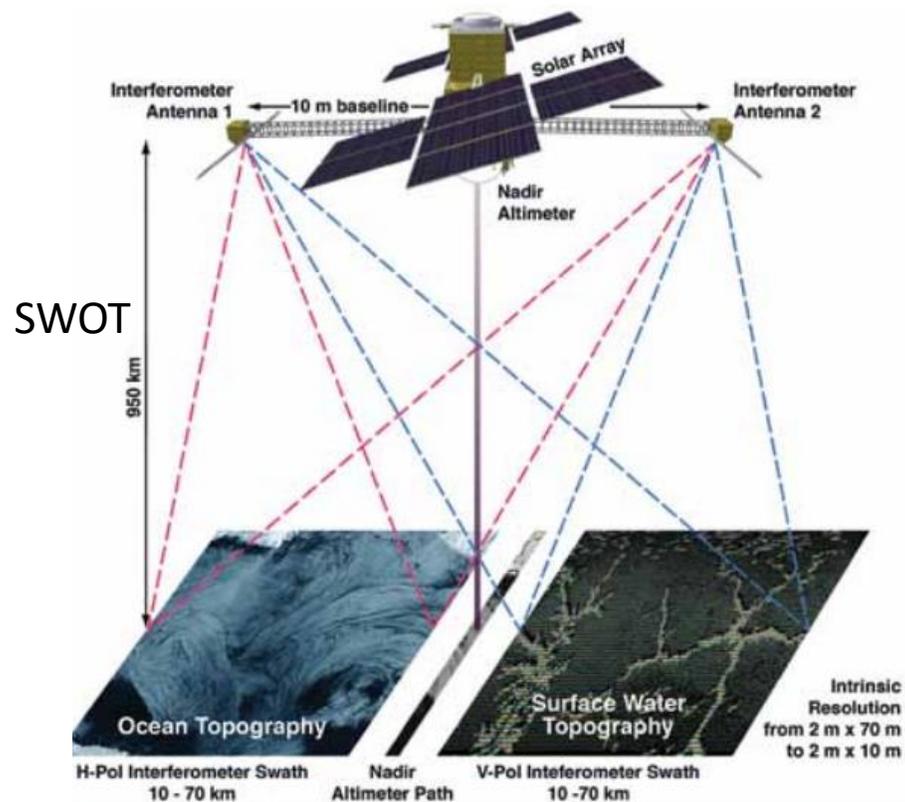
Концентрация хлорофилла



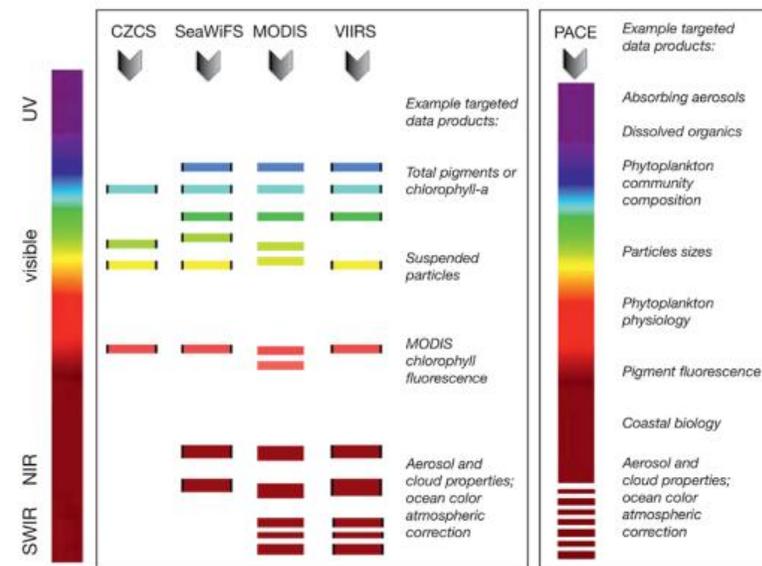
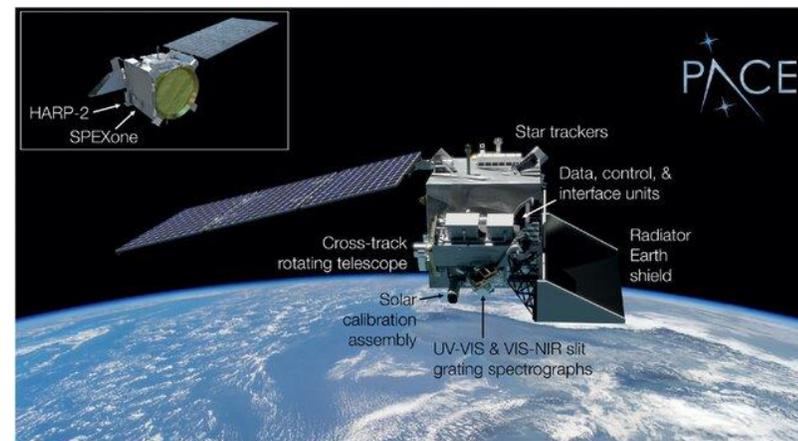
Sep 1997

Миссия SWOT – интерференционный альтиметр – дает возможность наблюдать вихри радиусом от 3-4 км

Данные доступны с 2023 г



Configuration of a wide-swath altimetry mission based on the radar interferometry technique.

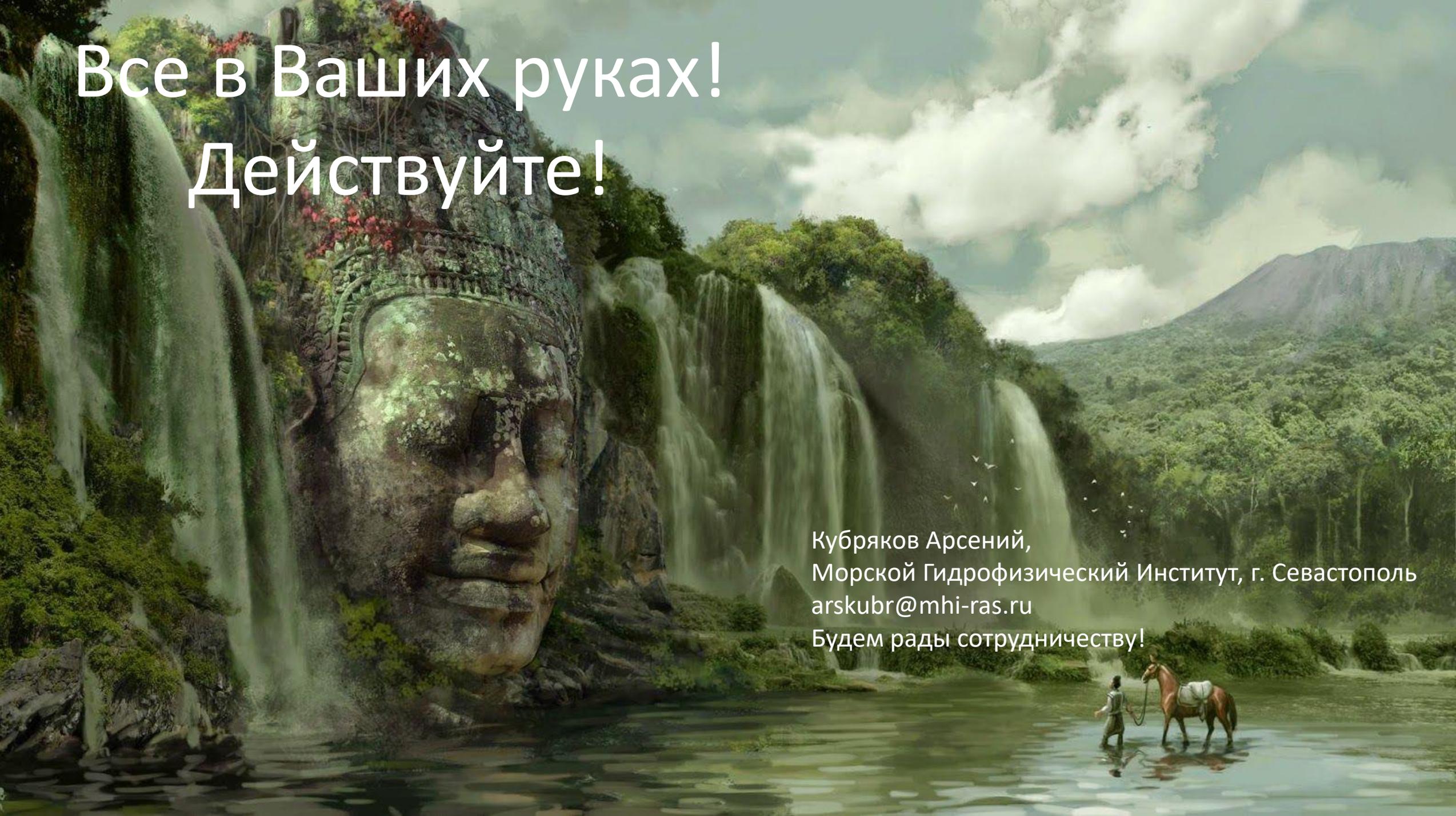


PACE – гиперспектральный радиометр с разрешением 5 нм

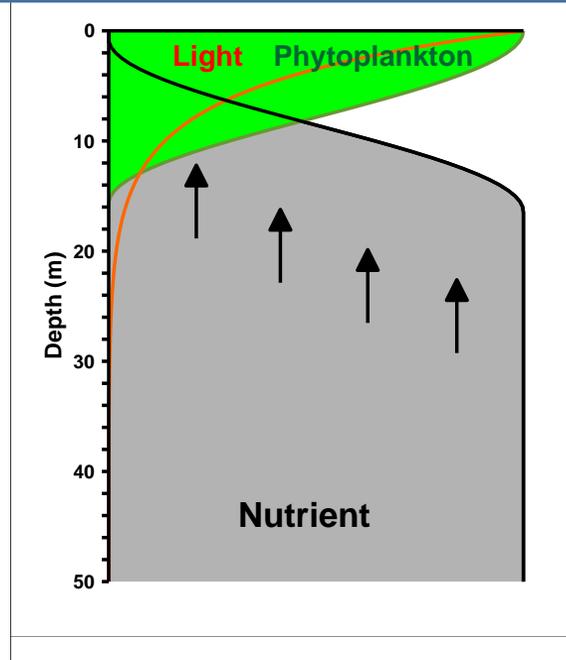
Данные доступны с 11 апреля 2024 г

Все в Ваших руках!
Действуйте!

Кубряков Арсений,
Морской Гидрофизический Институт, г. Севастополь
arskubr@mhi-ras.ru
Будем рады сотрудничеству!



Вертикальный обмен



Важнейшее влияние на динамику фитопланктона оказывают вертикальные движения

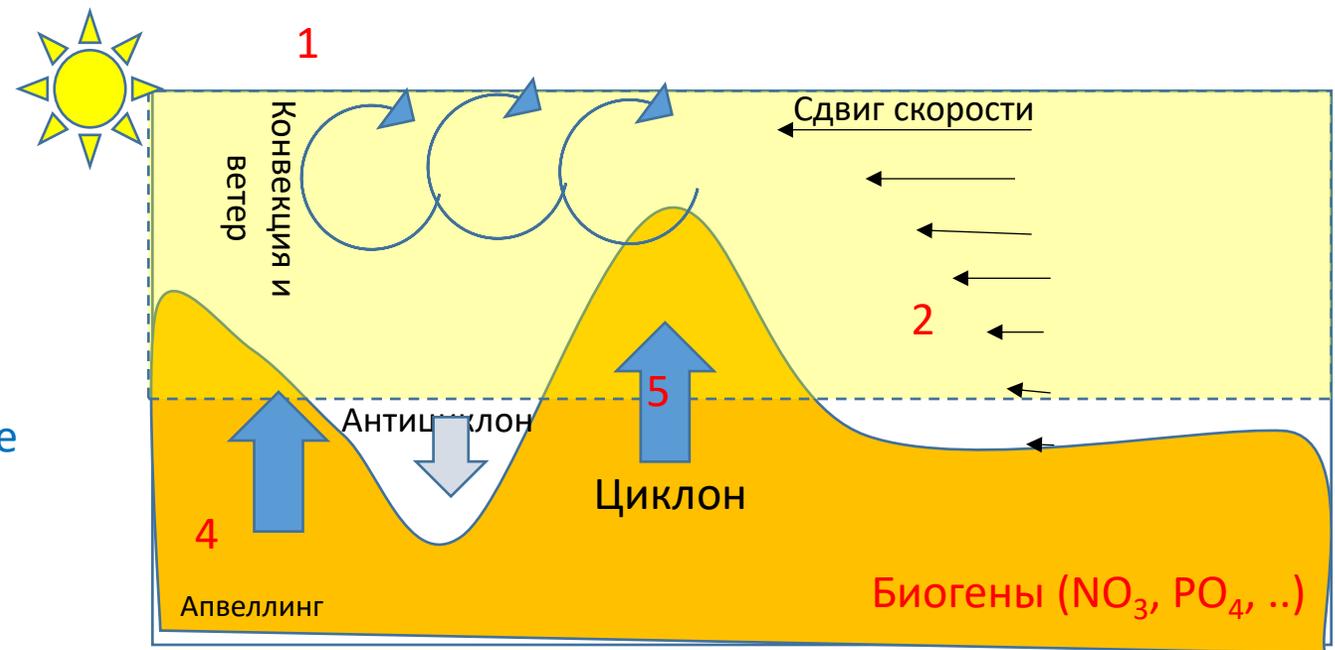
Биогены в верхнем слое, где есть свет (фотическом), быстро выедаются.

Фитопланктон оседает, и в нижнем слое опять переходит в неорганическое вещество (биогены) – реминерализация

При усилении вертикальных движений биогены попадают в верхний слой – происходит цветение фитопланктона

Процессы, которые влияют на вертикальный обмен:

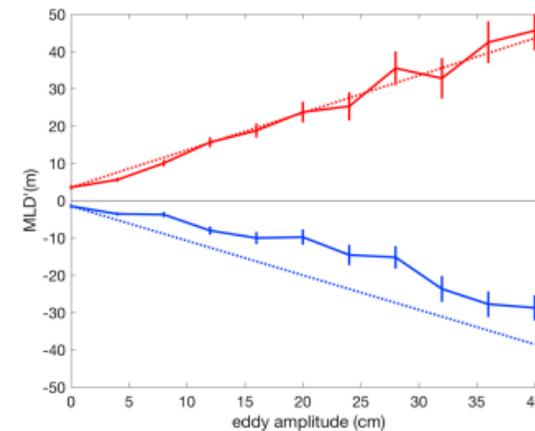
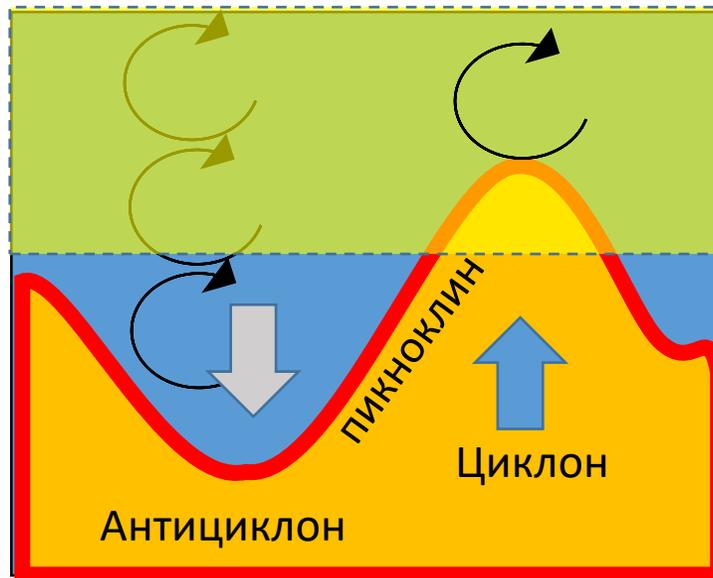
- 1. Вертикальный подъем вод (адвекция)** в вихрях, круговоротах, прибрежных апвеллингах,
- 2. Вертикальное перемешивание:** конвективное (вызванное охлаждением), ветровое, сдвиговое (сдвиг течений) и др.



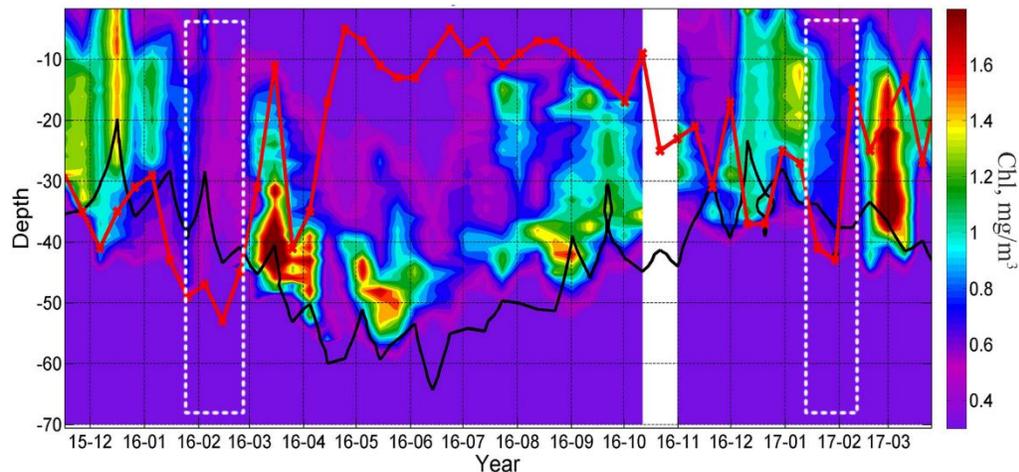
Влияние вихрей на ВКС и освещенность

В зимний период в зонах **конвергенции опускания вод** - заглубляется пикноклин – барьер, сдерживающий перемешивание → глубже перемешанный слой

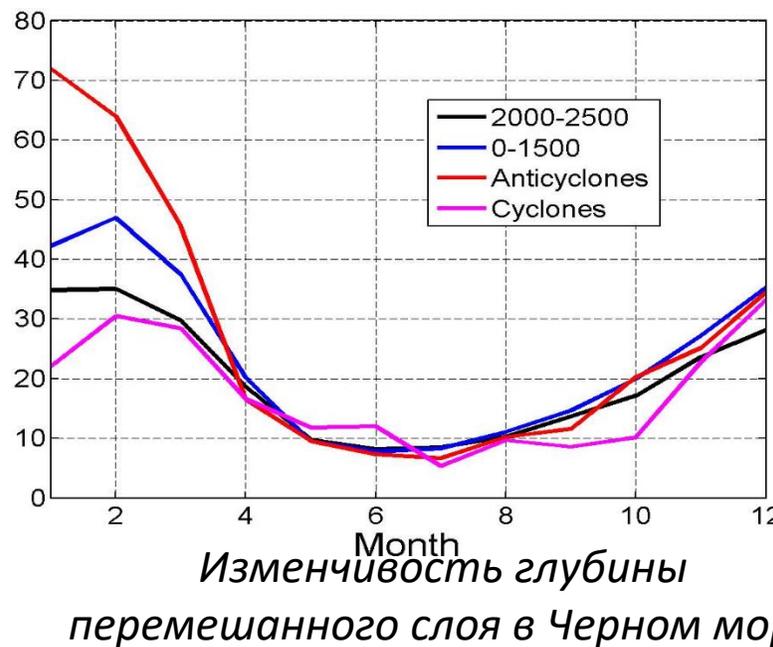
В результате из-за недостатка освещенности гибнет фитопланктон (Критерий Свердрупа)



Глобальные оценки связи интенсивности вихрей и аномалии толщины ВКС (Gaube et al., 2019)



Хл в Черном море по данным буя Био-Арго №7900591

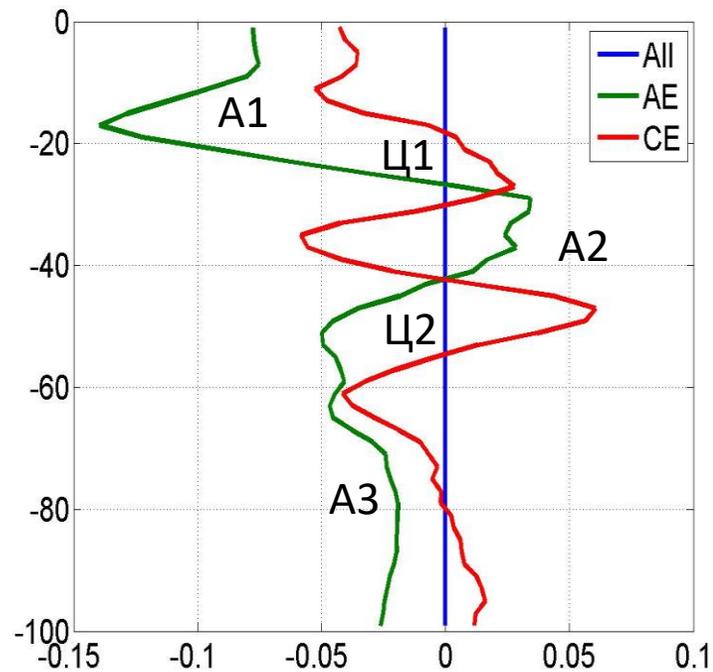


В Черном море в антициклонах ВКС может быть в 3 раза выше, чем в окружающих водах

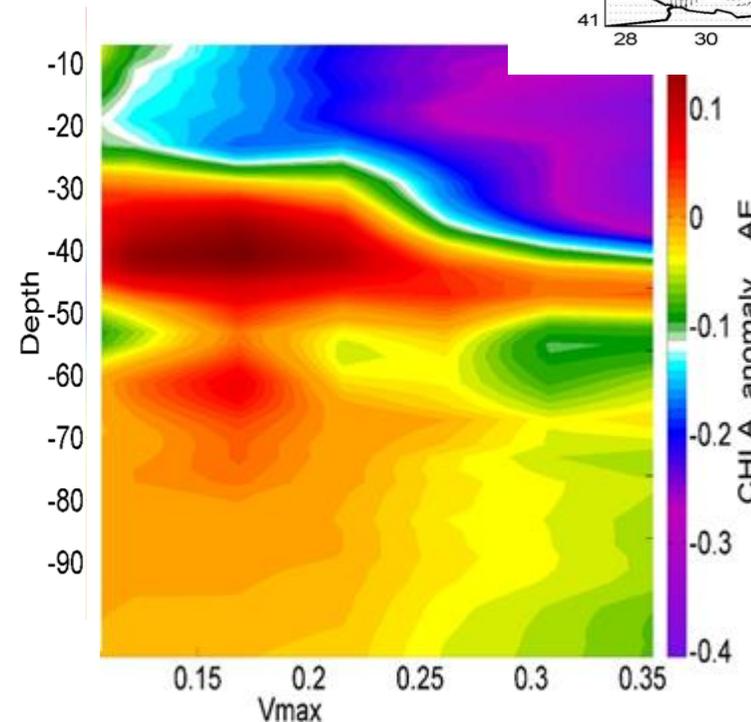
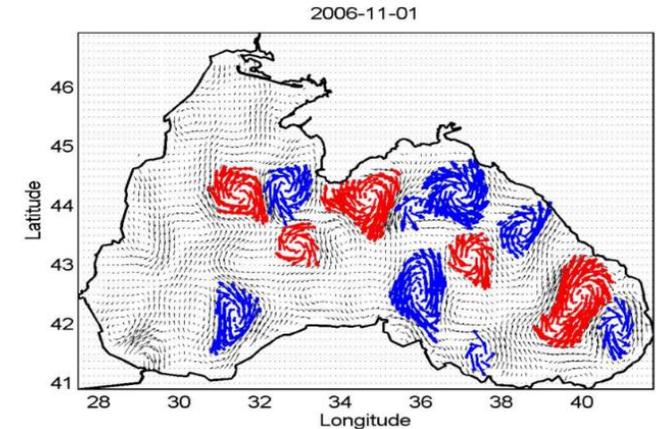
Такие события приводят к тому, что в феврале в Черном море в антициклонах фиксируется минимальные значение Хл во всем водном столбе.

Влияние вихрей на концентрацию Хл А по данным буев Био-Арго

Композитный анализ данных о хлорофилле и методы автоматической идентификации вихрей позволяют понять как вихри влияют на вертикальную структуру Хл



Аномалия профиля Хл в циклонах (красная) и антициклонах (зеленая) по сравнению с водами вне вихрей (синяя) для глубин более 1000м.



Изменение аномалии Хл в АВ при увеличение его орбитальной скорости

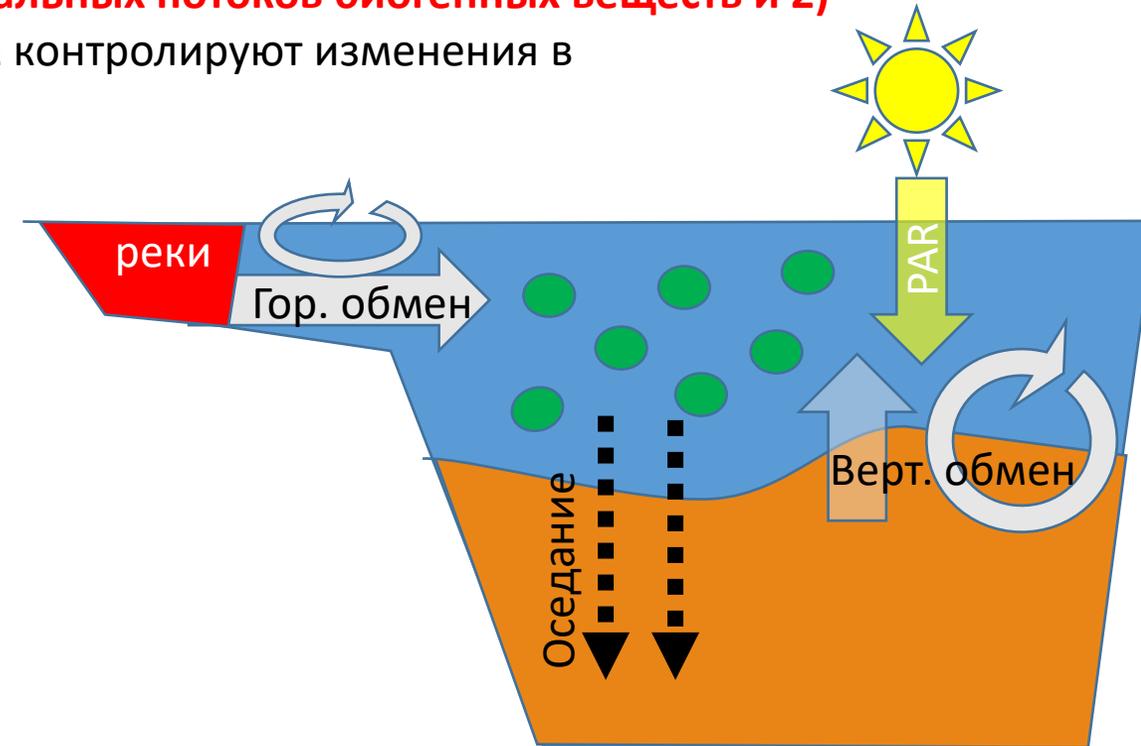
Изменчивость физических условий: **1) горизонтальных и вертикальных потоков биогенных веществ и 2) освещенности** определяет развитие фитопланктона и во-многом контролируют изменения в функционировании морских экосистем

1) Горизонтальный обмен имеет особо важное значение для окраинных морей и зависит от:

- крупномасштабных течений,
- синоптических вихрей,
- дрейфовых течений
- апвеллингов...

Вертикальный обмен способствует переносу питательных веществ в фотический слой из нутриклина и зависит от

- вертикальной адвекции,
- вертикального перемешивания: конвективного, ветрового, сдвигового и др.
- изменения стратификации вод ...

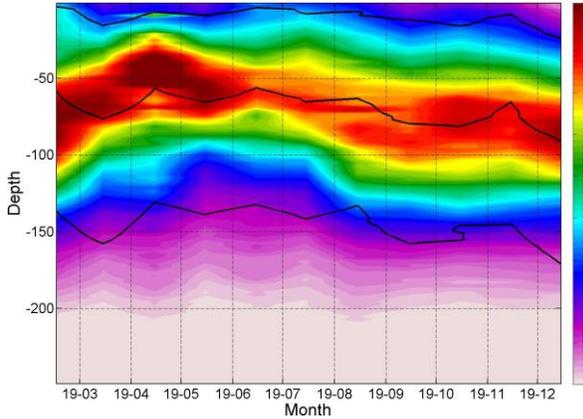


2) Условия освещенности зависят от

- поступающей солнечной радиации,
- вертикального распределения оптически-активных веществ,
- вертикального перемешивания, которое определяет время нахождения фитопланктона в зоне освещенности

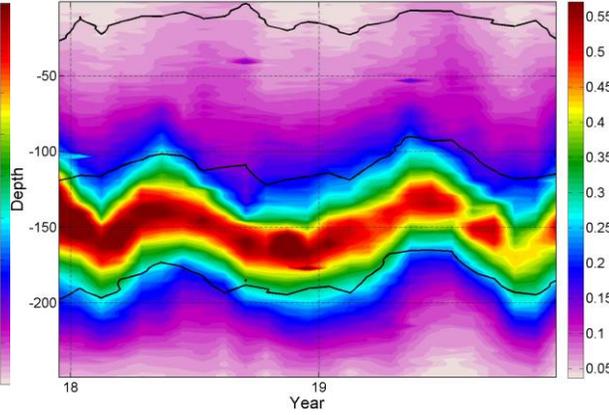
Вертикальное распределение концентрации хлорофилла по данным буев био-Арго

Anomaly mon Diagramm Int Y= -9 X= -139 CHLA Buoy 6902906



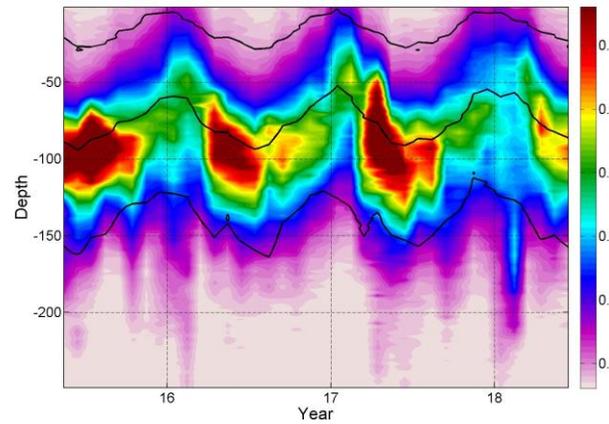
Экватор

Anomaly mon Diagramm Int Y= -19 X= -25 CHLA Buoy 3902124



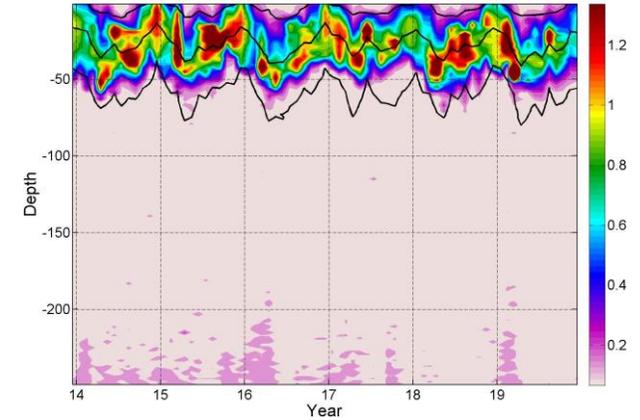
Тропическая Атлантика

Anomaly mon Diagramm Int Y= 34 X= 25 CHLA Buoy 6901765



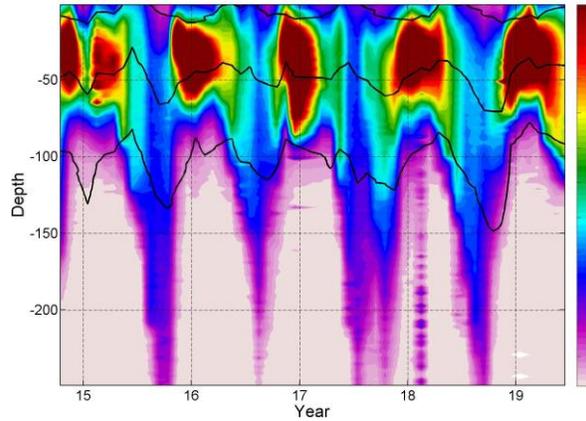
Средиземное море

Anomaly mon Diagramm Int Y= 43 X= 29 CHLA Buoy 7900591



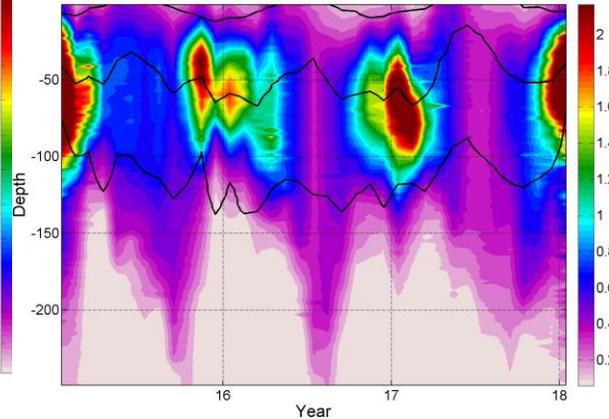
Черное море

Anomaly mon Diagramm Int Y= -39 X= -29 CHLA Buoy 3901498



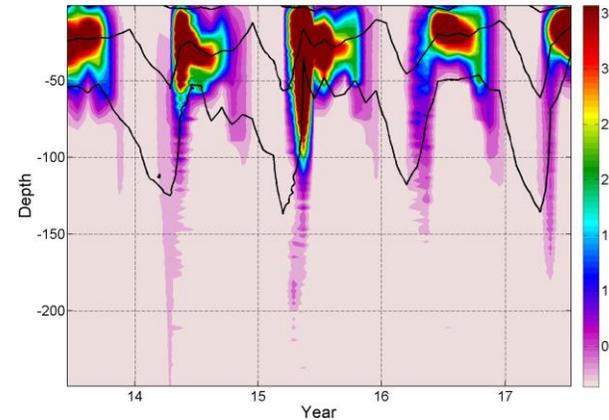
Субтропический фронт

Anomaly mon Diagramm Int Y= -49 X= 72 CHLA Buoy 6901004



Южный океан

Anomaly mon Diagramm Int Y= 63 X= -30 CHLA Buoy 6901486

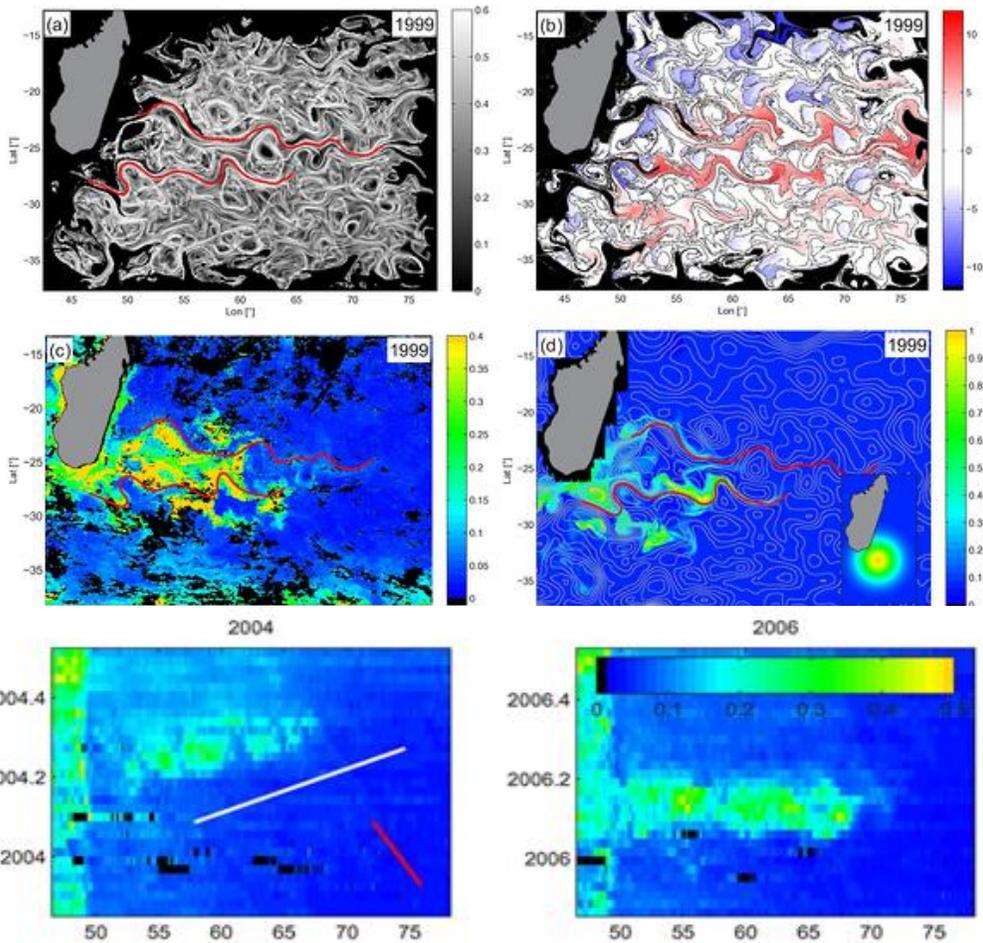


Субполярная Атлантика

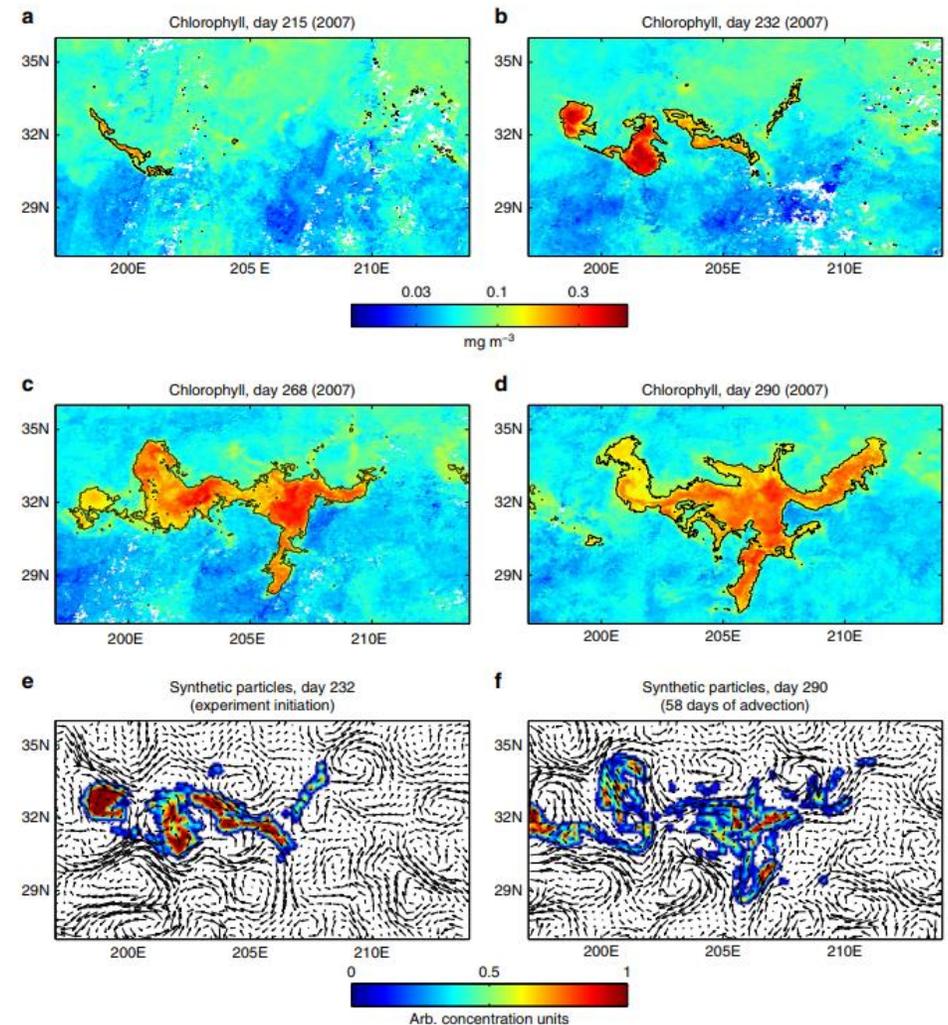
Во всех районах наблюдается **подповерхностный максимум Хл**, который имеет значительно различающееся вертикальное положение и изменчивость

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

Влияние адвекции течений на распространение зон цветения фитопланктона

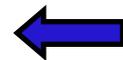
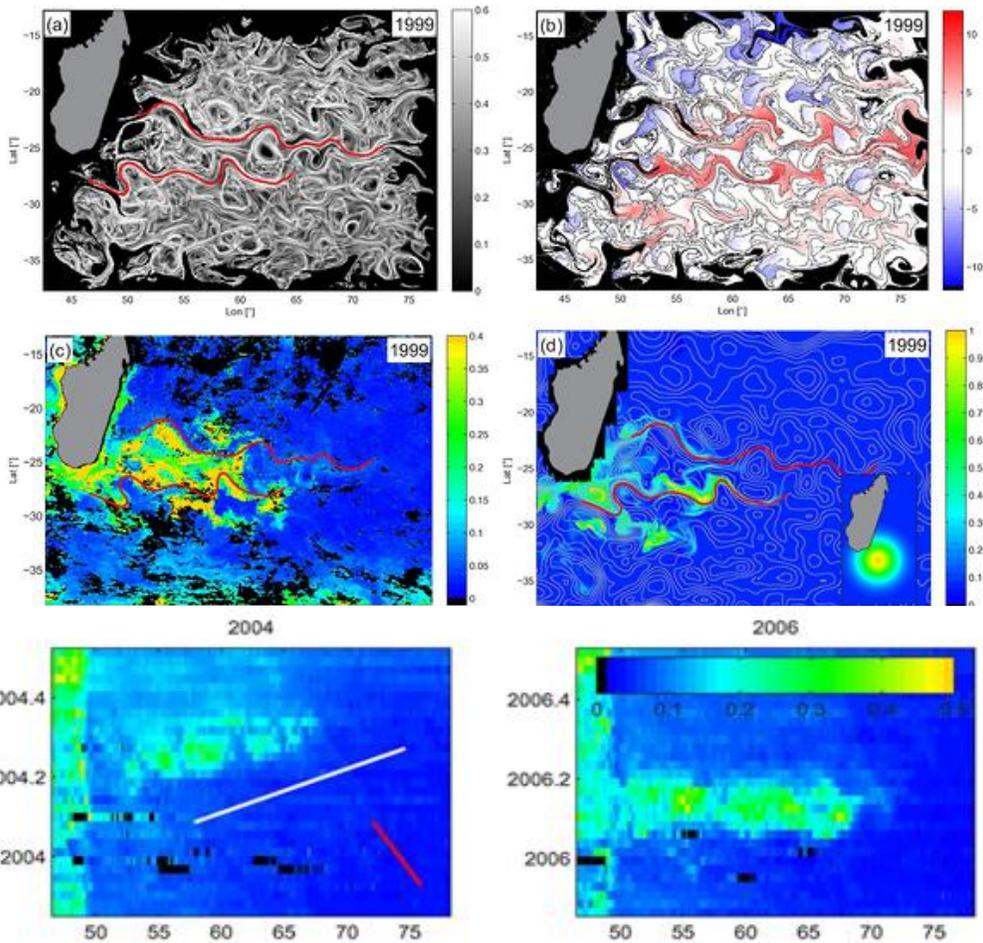


Адвекция вод от Мадагаскара как причина цветений в центральном Индийском океане
[Huhn et al. \(2012\)](#)

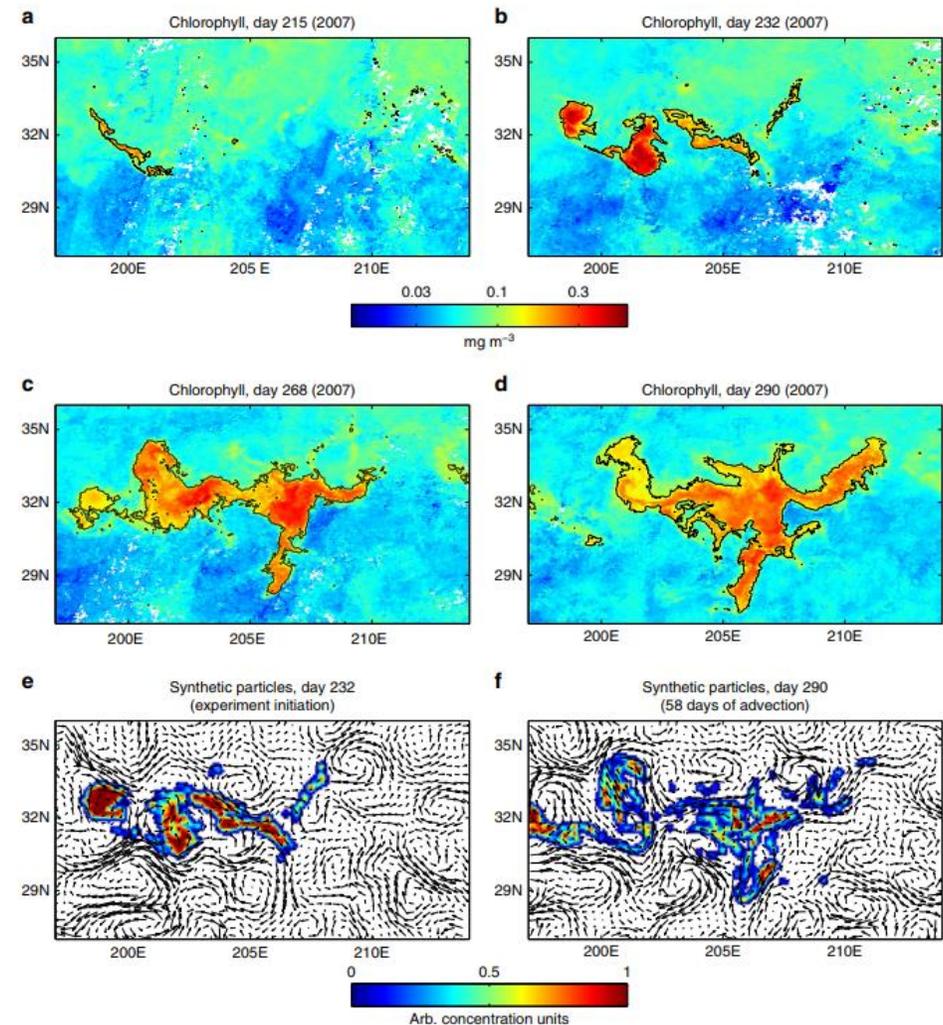


Распространение хлорофилла от первоначальной зоны цветения в Тихом океане
[Lehahn et al. \(2017\)](#)

Влияние адвекции течений на распространение зон цветения фитопланктона



Адвекция вод от Мадагаскара как причина цветений в центральном Индийском океане
[Huhn et al. \(2012\)](#)

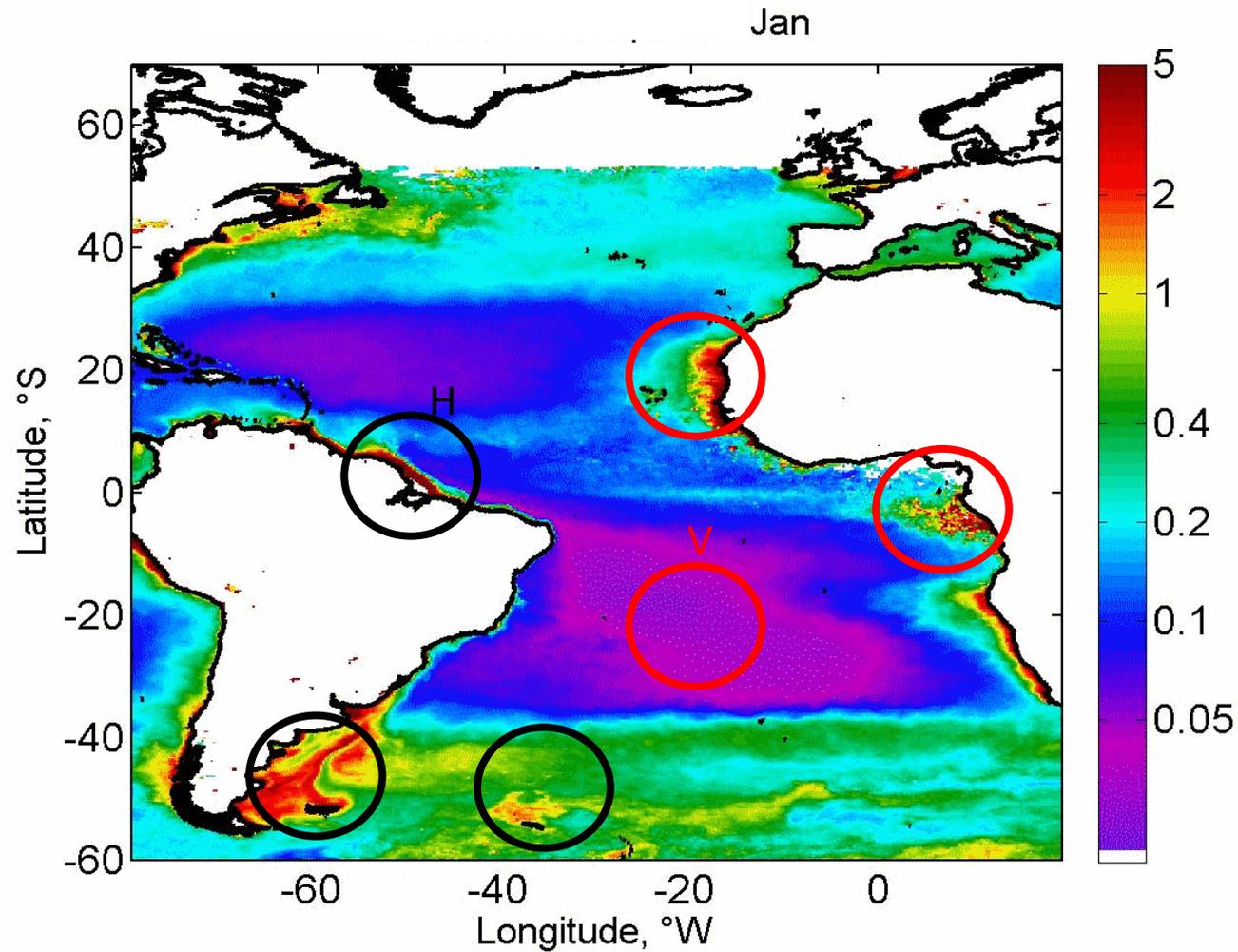


Распространение хлорофилла от первоначальной зоны цветения в Тихом океане
[Lehahn et al. \(2017\)](#)

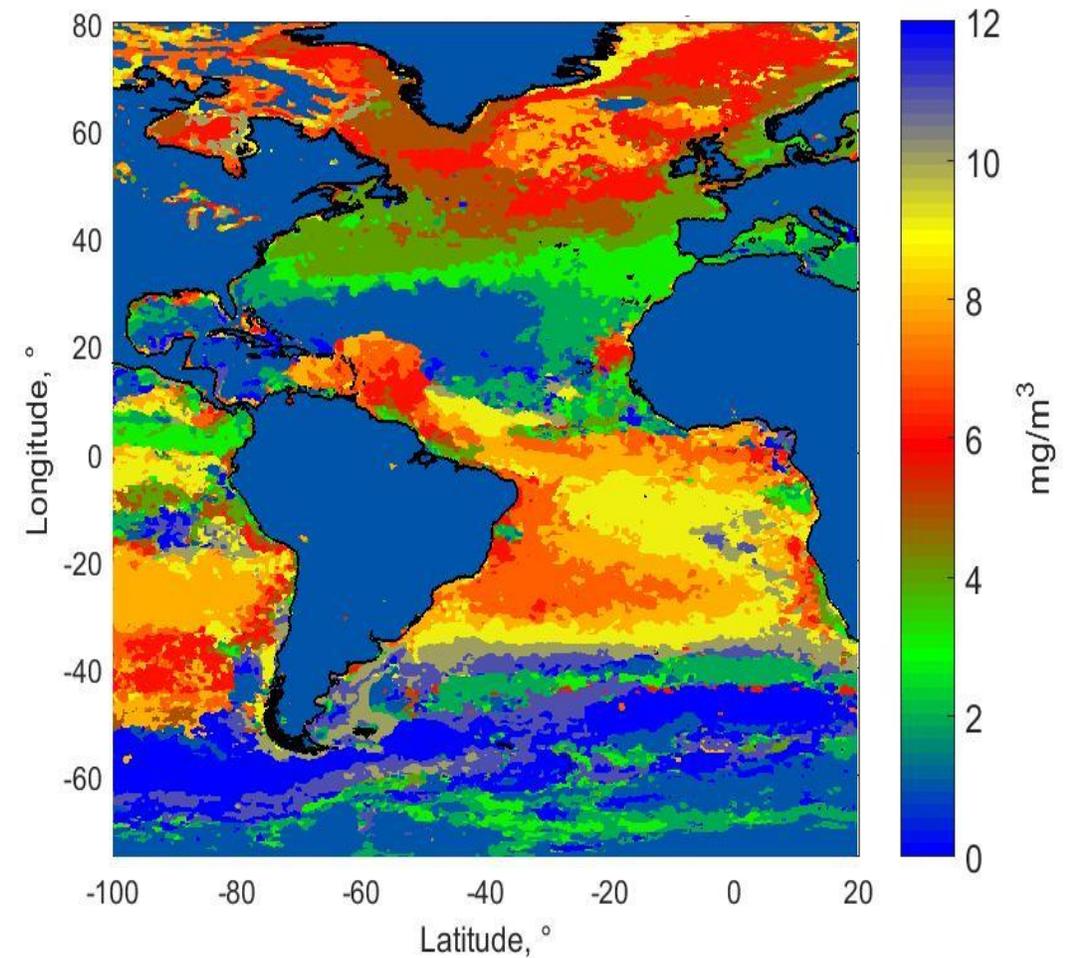


Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла А

Хлорофилл А – основной фотосинтезирующий пигмент (зеленый), который меняет цвет океана



Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла А в Атлантике



Время максимума цветения хлорофилла А в месяцах