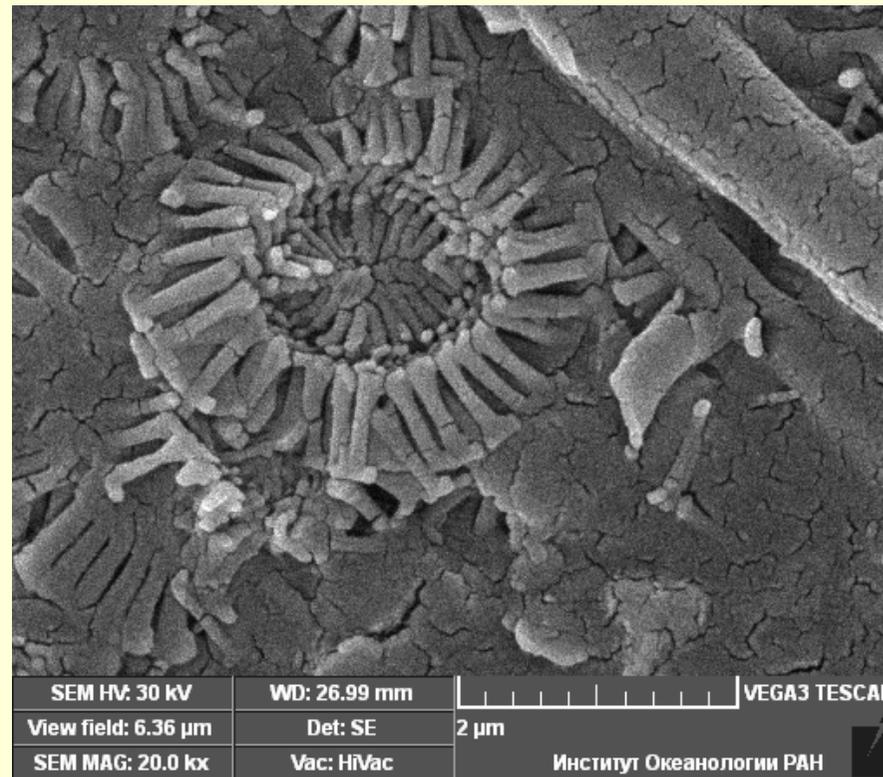
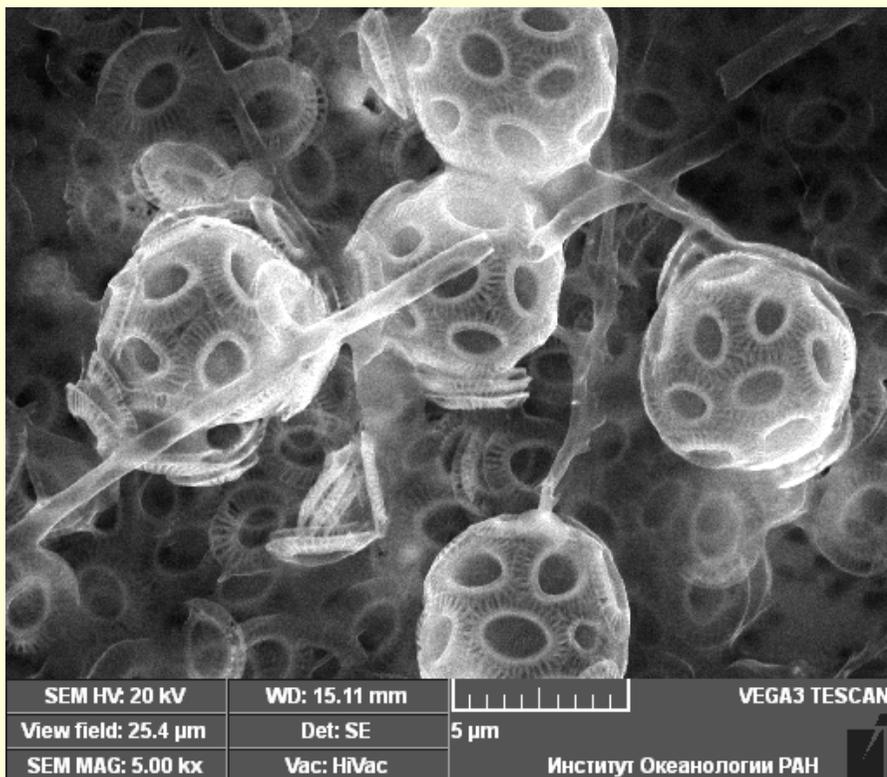


**Исследование кокколитофоридных цветений  
в Баренцевом и Черном морях  
по спутниковым данным**

О. Копелевич (ИО РАН, Москва)

## Что такое кокколитофориды

Кокколитофориды (*coccolithophoride*), также называемые *coccolithophore*) - одноклеточная водоросль со сферическими клетками, покрытыми дискообразными частицами (*coccoliths*), состоящими из карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ .



Черноморские кокколитофориды *Emiliana huxleyi* под электронным микроскопом.  
Слева – клетки кокколитофорид, покрытые кокколитами (**plated cells**),  
справа - целые и разрушенные кокколиты

## Кокколитофоридные цветения – климатически значащий фактор

- Широко распространены в Атлантическом, Тихом, Индийском океанах и во многих морях, охватывая громадные площади (превышающие временами 100 тыс. кв.км) и оказывая существенное влияние на важные физические и биогеохимические процессы (в частности, «окисление» (acidification) поверхностного слоя вод).
- Мощнейшие продуценты  $\text{CaCO}_3$ , могут оказывать существенное влияние на обмен углекислым газом между океаном и атмосферой. Обуславливают действие «карбонатного биологического насоса».
- Вследствие сильного светорассеяния, могут существенно увеличивать альbedo океана и тем самым влиять на баланс солнечного излучения и тепловой баланс океана.
- *Emiliana huxleyi* обладает способностью продуцировать диметилсульфид, который, попадая в атмосферу, способствует образованию облачности и изменению планетарного альbedo.
- Поток кокколитов на океанское дно обуславливает образование подводных меловых и известняковых холмов.

### **Coccolithophores. From Molecular Processes to Global Impact**

Thierstein, Hans R.; Young, Jeremy R. (Eds.). 2004, XIV, 565 p. 135 illus.,

## Проявление кокколитофоридных цветений (КЦ) на спутниковых изображениях

Кокколитофориды обладают сильным слабоселективным светорассеянием, что дает возможность наблюдать КЦ по данным спутниковых сканеров цвета. На спутниковых изображениях Баренцевого и Черного морей из года в год обнаруживается помутнение поверхностного слоя – в Баренцевом в июле-сентябре, в

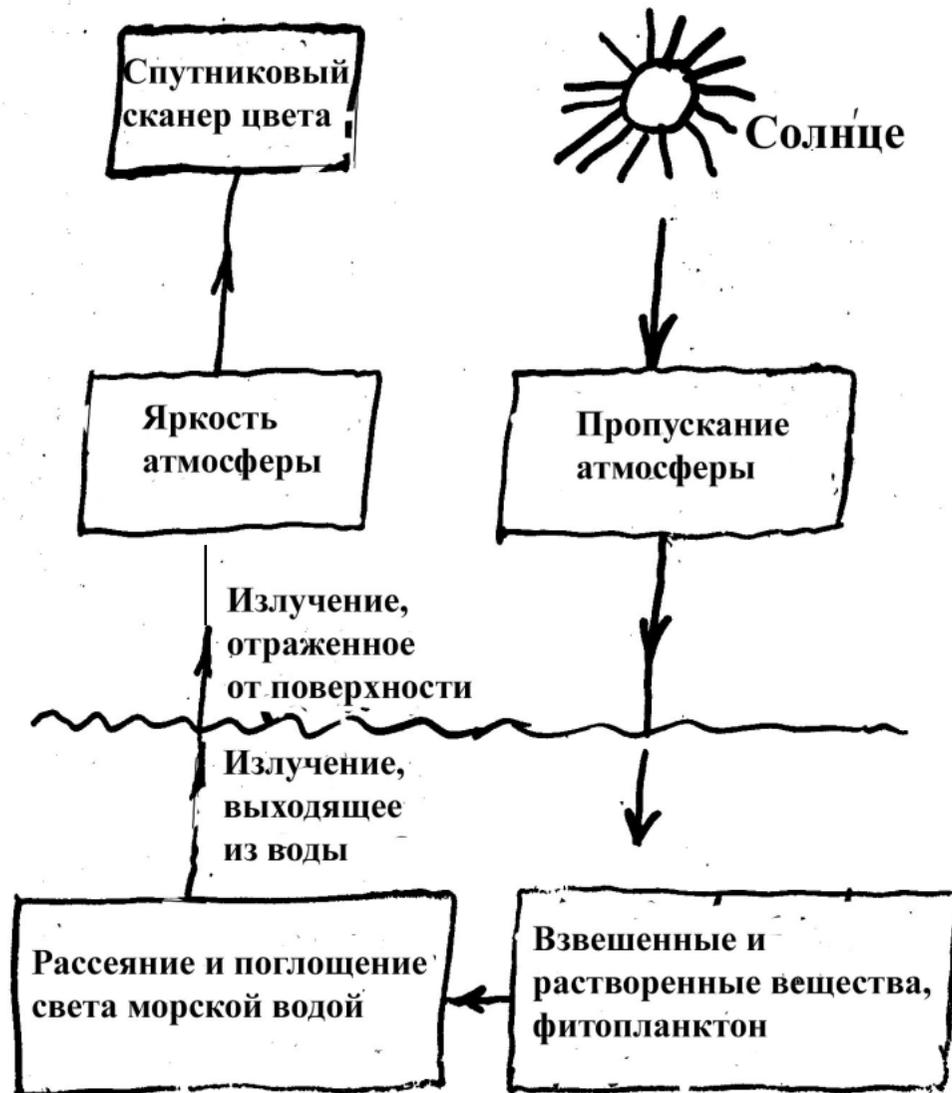


Баренцево море. Данные MODIS-Aqua. 31 августа 2010г.



Черное море. Данные SeaWiFS 11 июня 2000 г.  
На изображении видны речные выносы Дуная, кавказских и турецких рек, распространяющиеся из прибрежной зоны в открытое море.

## Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



Спутниковый датчик измеряет спектральную яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы, которая в значительной степени определяется вкладами атмосферы и отражения от поверхности.

Спектральная яркость выходящего из воды излучения определяется оптическими свойствами морской воды, которые зависят от количественного и качественного состава содержащегося в морской воде вещества.

## Составляющие яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы

$L_t(\lambda_i)$  – спектральная яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеряемая спутниковым датчиком:

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i),$$

где  $L_r(\lambda_i)$  и  $L_a(\lambda_i)$  – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;

$L_g(\lambda_i)$  и  $L_{wc}(\lambda_i)$  – яркости, обусловленные, соответственно, солнечными бликами и диффузным отражением пеной;

$T(\lambda_i)$  и  $t(\lambda_i)$  – направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой;

$L_w(\lambda_i)$  – искомая яркость излучения, вышедшего из водной толщи.

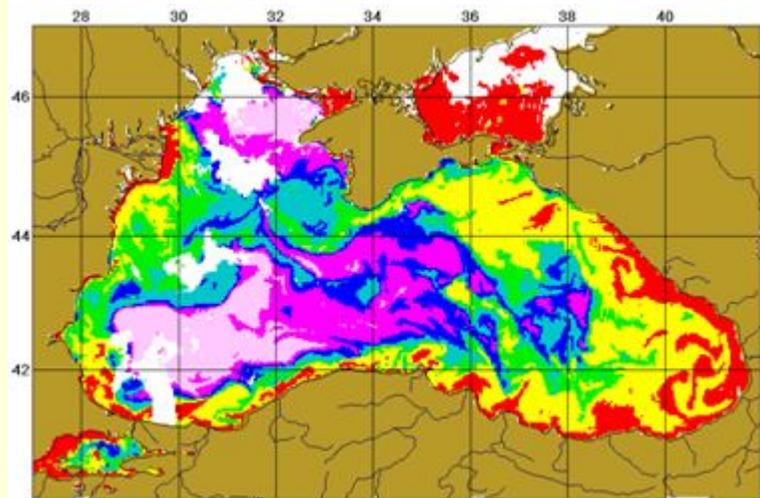
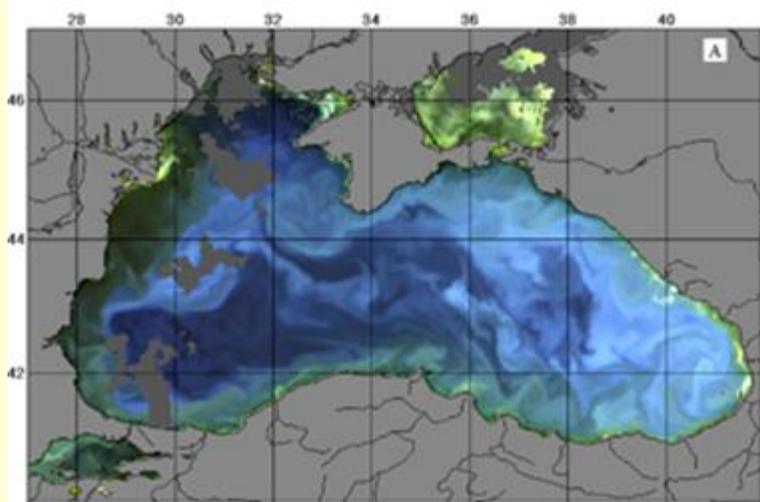
Вышеперечисленные яркости зависят от зенитного и азимутального углов Солнца  $\theta_0, \varphi_0$  и наблюдения  $\theta, \varphi$ .

## Два главных этапа обработки данных спутниковых сканеров цвета

1. Атмосферная коррекция – определение спектральных значений яркости  $L_w(\lambda_i)$  излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости  $L_i(\lambda_i)$  восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком.
2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости  $L_w(\lambda_i)$  излучения, вышедшего из водной толщи. В случае мелкого моря с учетом отражения ото дна.

## Количественная оценка наблюдаемого помутнения

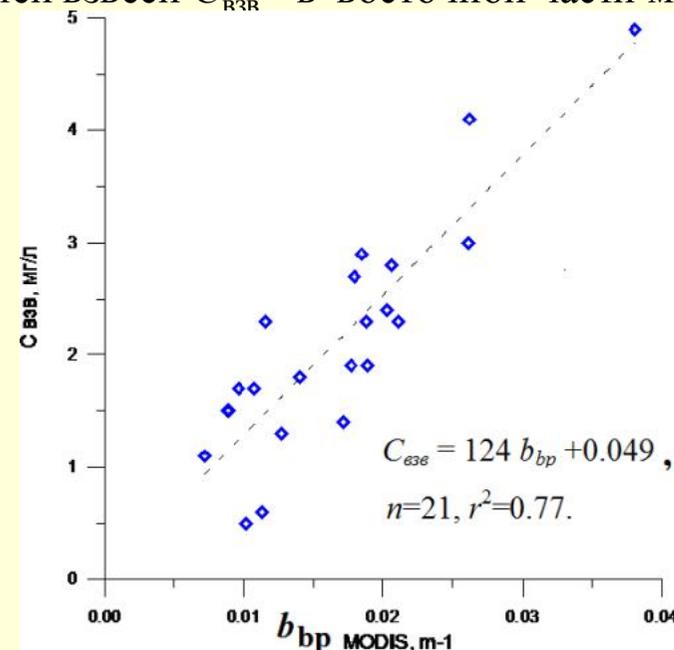
Оптический параметр, который определяется по спутниковым данным и используется для количественной оценки - показатель рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$ .



Слева сверху - спутниковое изображение Черного моря в видимом цвете (вверху);

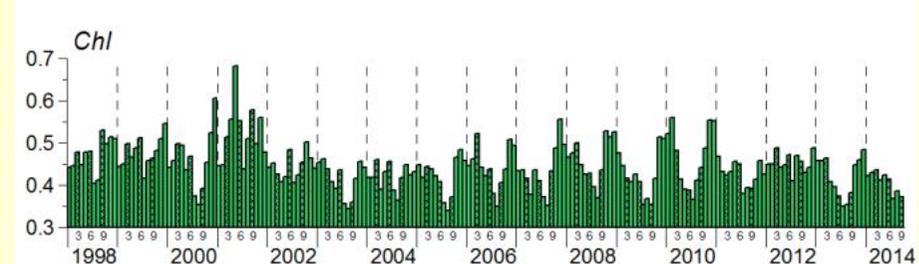
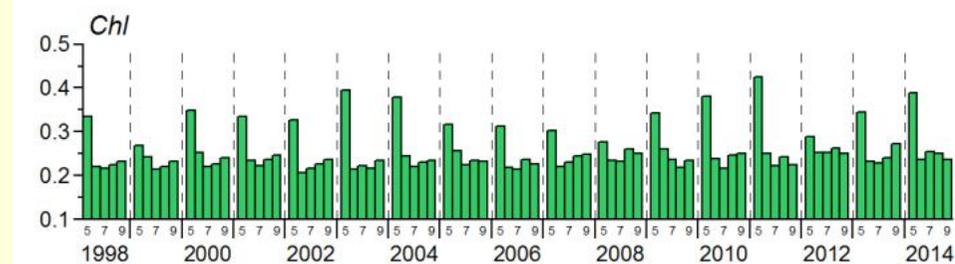
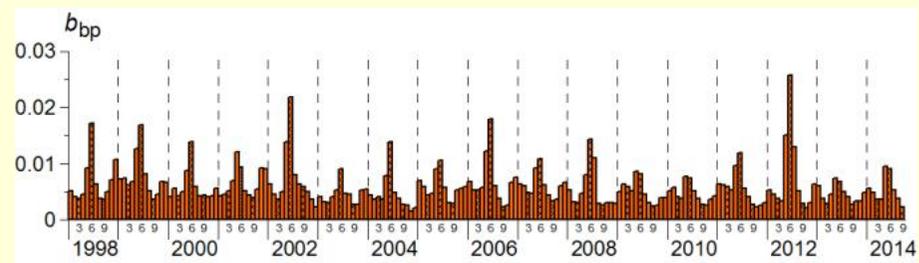
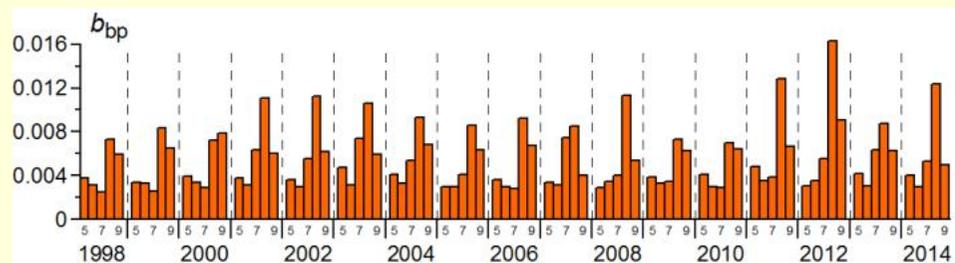
Слева внизу - пространственное распределение показателя  $b_{bp}$  (, рассчитанное по спутниковым данным;

Внизу – регрессионная связь между рассчитанным показателем  $b_{bp}$  и измеренной весовой концентрацией взвеси  $C_{RZR}$  в восточной части моря.



Данные спутникового сканера MODIS-Aqua .  
Черное море.12 июня 2004 г.

Сезонная и межгодовая изменчивость среднемесячных значений показателя рассеяния взвешенными частицами  $b_{bp}$ ,  $m^{-1}$  и концентрации хлорофилла  $Chl$ ,  $mg \cdot m^{-3}$  в Баренцевом и Черном морях



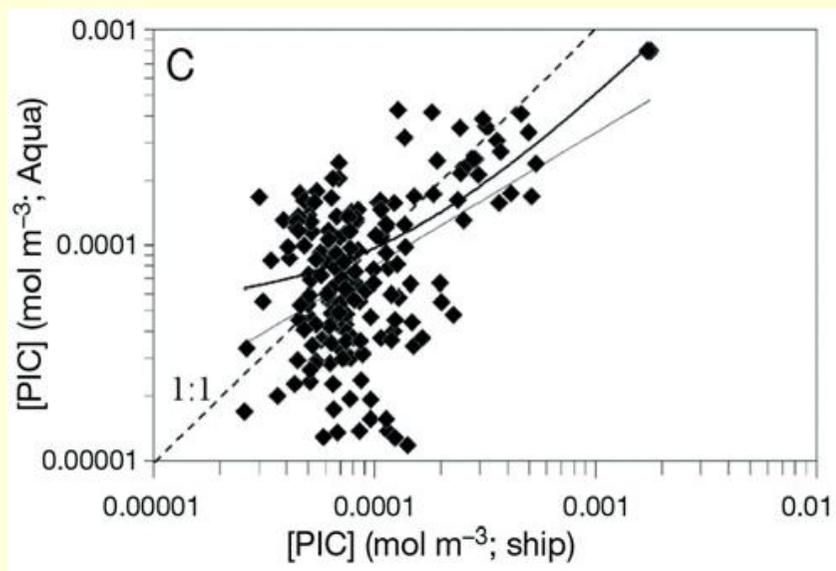
Средняя часть Баренцева моря

Восточная глубоководная часть  
Черного моря

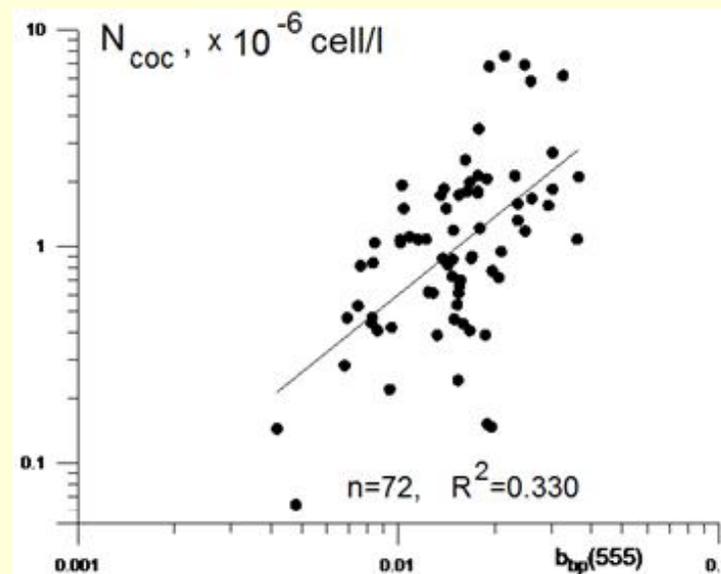
## Алгоритмы для количественной оценки кокколитофоридных цветений по спутниковым данным

Два этапа: на первом рассчитываются значения показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$ , на втором – через рассчитанные значения  $b_{bp}$  определяются параметры КЦ.

Алгоритмы, разработанные для спутниковых сканеров SeaWiFS, MODIS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/seadas/>) и MERIS (Ebert et al. 2008), рассчитывают концентрацию кальцита; алгоритмы ИОРАН - концентрацию кокколитофорид. Точность и тех и других алгоритмов невысока.



Концентрации кальцита на трансатлантическом разрезе от 50°с.ш. до 40°ю.ш. по данным сканера MODIS-Aqua и судовых измерений (Balch, Fabry 2008).



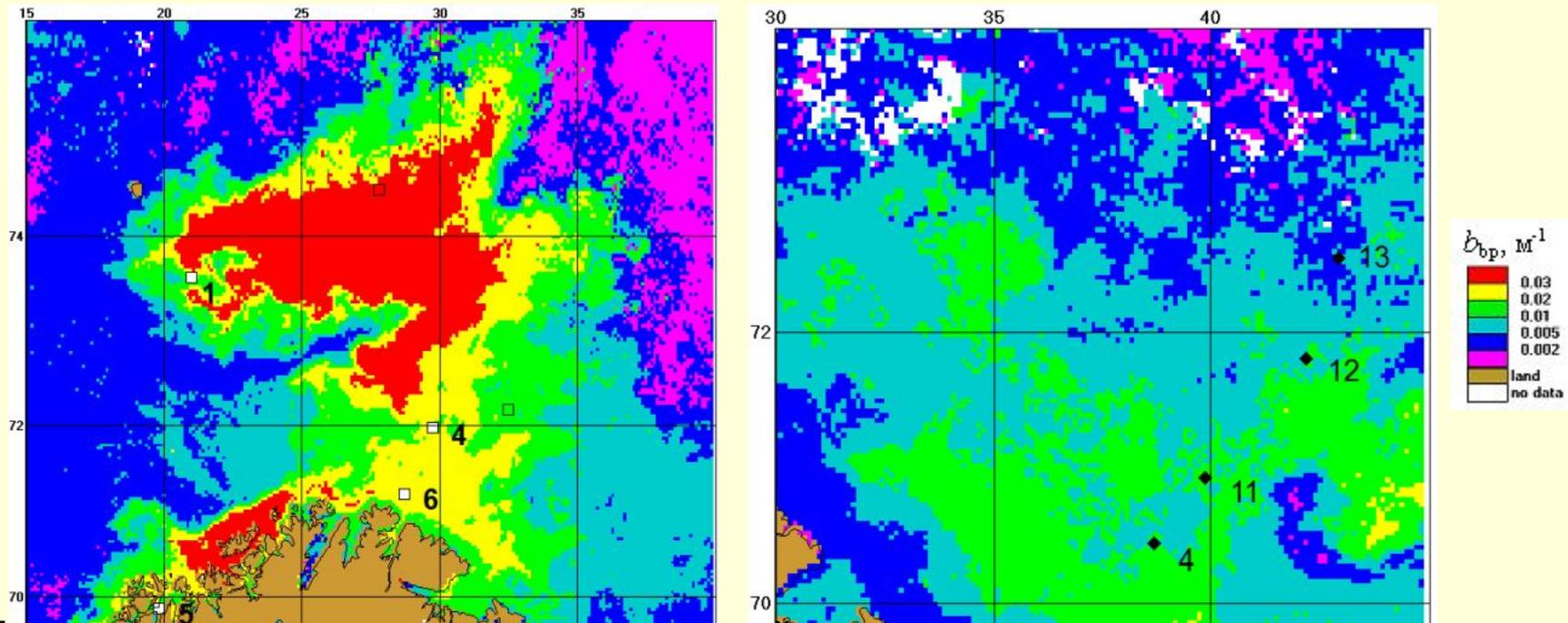
Связь между концентрацией кокколитофорид  $N_{coc}$ , млн.кл./л и показателем  $b_{bp}$ , м<sup>-1</sup> по данным судовых измерений в восточной части Черного моря, 2004-2008 гг.

## Необходимость учета вклада «некокколитофоридной» составляющей показателя рассеяния назад частицами $b_{br}$

Одна из причин невысокой точности упомянутых выше алгоритмов - неучет «некокколитофоридной» составляющей показателя рассеяния назад частицами  $b_{br}$ . С этой точки зрения, Баренцево и Черное моря существенно различаются: в Черном море вклад в  $b_{br}$  «некокколитофоридной» составляющей может быть значительным из-за поставки взвешенных частиц речным стоком (Kopelevich et al., 2008); в Баренцевом море в районах, где наблюдаются КЦ (<http://optics.ocean.ru>), влияние речного стока практически отсутствует.

# Баренцево море

Данные судовых измерений в Баренцевом море были получены только для концентрации фитопланктона (в частности кокколитофорид и кокколитов) на поверхностных пробах воды в западной части моря в рейсах в 2004 г. (28 июля - 13 августа) и 2009 г. (25 августа-21 сентября).



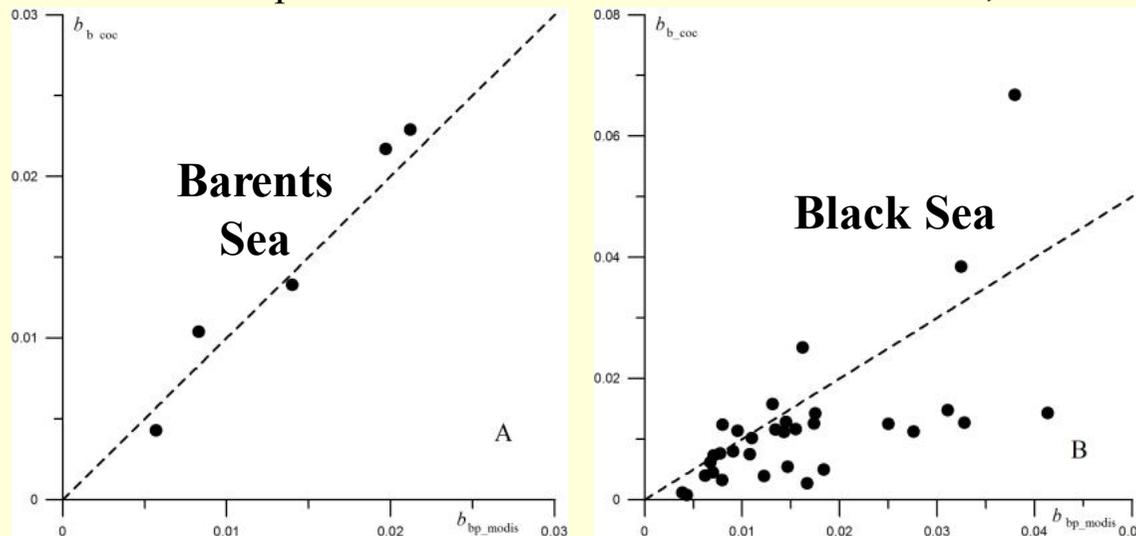
Пространственные распределения значений показателя рассеяния назад взвешенными частицами ( $b_{bp}$ ,  $M^{-1}$ ) в западной части Баренцевого моря, осредненные за периоды 26 июля-14 августа 2004 г. (слева) и 24 августа-24 сентября 2009 г. (справа) по данным спутникового сканера цвета MODIS-Aqua. Цифры на рисунках – номера точек отбора проб.

## Решение прямой задачи: расчет показателя $b_{bp}$ через концентрации кокколитофорид (plated cells) и кокколитов

Для Баренцева моря рассматривается простая модель, в предположении, что показатель  $b_{bp}$  есть сумма показателей рассеяния назад кокколитофорид (plated cells)  $b_{bcf}$  и отделившихся кокколитов  $b_{bc}$

$$b_{bp} = b_{bcf}^* N_{cf} + b_{bc}^* N_c \quad (1)$$

где  $b_{bcf}^*$  и  $b_{bc}^*$  - коэффициенты рассеяния назад для клеток кокколитофорид и кокколитов. Рассматривалась возможность использования для этих коэффициентов значений, полученных в работе Voss et al. (1998) в результате измерений на культурах кокколитофорид. Эти значения для 550 нм равны  $6.6 \cdot 10^{-12}$  м<sup>2</sup>/кл и  $1.6 \cdot 10^{-13}$  м<sup>2</sup>/шт, соответственно.



Как видно, наблюдается заметное различие между Баренцевым и Черным морями. В Баренцевом море различие между расчетами по (1) и по данным MODIS не превышает 25%, тогда как в Черном море значения  $b_{bp}$  по данным MODIS для большинства точек заметно выше, чем по (1). Это объясняется «некокколитофоридным» вкладом, который не учитывается. (1).

Сравнение значений  $b_{bp}$ , рассчитанных по формуле (1) и по данным спутникового сканера MODIS-Aqua.

## Разработка спутникового алгоритма для Баренцева моря

Из (1) получаем :

$$N_{cf} = b_{bp} / (b_{bcf}^* + \alpha b_{bc}^*), \quad (2)$$

где  $\alpha = N_c / N_{cf}$  ,  $N_{cf}$  и  $N_c$  – в млн.кл/л,  $b_{bp}$  – в  $m^{-1}$  ,

Подставляя численные значения  $b_{bcf}^*$  и  $b_{bc}^*$  , получаем:

$$N_{cf} = 152b_{bp} / (1 + 0.024\alpha) = K b_{bp} \quad (2a)$$

Для наших данных значения  $\alpha$  изменяются примерно в 20 раз,  $K$  – примерно в 3 раза. Если информация о величине  $\alpha$  отсутствует, надо выбрать какое-то фиксированное ее значение, для которого вариации  $K$  минимальны.

Анализ показывает, что это примерно 54; соответствующее значение  $K$  равно  $\sim 66$ . В этом случае максимальная ошибка расчета  $N_{cf}$  через значения  $b_{bp}$ , рассчитанным как по (1), так и по данным MODIS примерно 50%.

Перспективы усовершенствования алгоритма связаны с получением статистических оценок, учитывающие, в частности, возраст КЦ, и, возможно, перехода к использованию в качестве параметра, характеризующего КЦ, концентрацию кальцита, а не клеток кокколитофорид.

# Черное море

Средний водный и твердый стоки рек, впадающих в Черное море (Михайлов, Михайлова 2008)

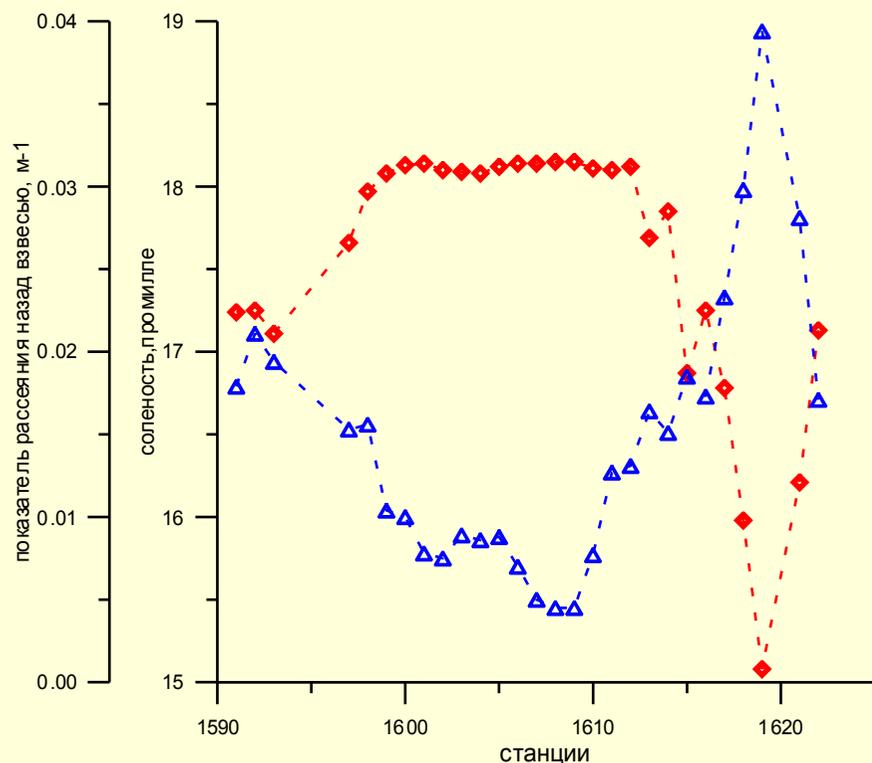
Сектор	Водосбор, $10^3 \text{ км}^2$	Средний годовой расход, $\text{м}^3 \text{ с}^{-1}$	Годовой водный сток, $\text{км}^3 \text{ year}^{-1}$	Годовой твердый сток, $10^6 \text{ t year}^{-1}$
Сев. – вост. (Россия)	5.1	201	6.4	1.6
Восточный (Грузия)	50.3	1450	45.7	18.6
Южный (Турция)	229	1190	37.7	13.6
Юго-западн. (Болгария)	8.7	37.3	1.2	0.75
Сев. – запад. (Румыния и Украина)	1465	8340	263.2	41.5
Крым (Украина)	2.2	8.8	0.28	0.13
<b>Всего</b>	<b>1760</b>	<b>11230</b>	<b>354.5</b>	<b>76.2</b>

Распространение речных вод в открытое море



SeaWiFS изображение восточной части Черного моря 25 июня 1998 г., показывающее распространение речных выносов из прибрежной зоны в открытое море.

## Влияние речного стока по данным судовых измерений



Изменение поверхностной солености (красные ромбики) и показателя рассеяния назад взвесью (синие треугольники) .

Скопление мелкой щепы в районе фронтальной зоны примерно в 30 милях от берега. 15.06.04

# Двухпараметрическая модель показателя рассеяния $b_{bp}$ в период июньского помутнения в восточной части моря

## Предположения, на которых основана модель

1. Увеличение показателя рассеяния назад взвешенными частицами  $b_{bp}$  в период КЦ, относительно его фонового значения  $b_{bp\_фон}$ , обусловлено двумя факторами: рассеянием кокколитофоридными частицами  $b_{b\_coc}$  и увеличением рассеянием частицами, вынесенными речным стоком,  $b_{b\_riv}$

$$\Delta b_{bp} = b_{bp} - b_{bp\_фон} = b_{b\_coc} + \Delta b_{b\_riv} \cdot \quad (1)$$

2. Рассеяние кокколитофоридными частицами  $b_{b\_coc}$  пропорционально числовой концентрации кокколитофорид  $N_{coc}$

$$b_{b\_coc} = K_{coc} N_{coc} \cdot \quad (2)$$

3. Увеличение рассеяния частицами, вынесенными речным стоком  $\Delta b_{b\_riv}$  пропорционально увеличению поглощения желтым веществом  $a_g$ , относительно его фонового значения  $a_{g\_фон}$

$$\Delta b_{b\_riv} = K_{riv} (a_g - a_{g\_фон}) \cdot \quad (3)$$

Т.о. модель имеет вид:

$$b_{bp} - b_{bp\_фон} = K_{coc} N_{coc} + K_{riv} (a_g - a_{g\_фон}) \cdot \quad (4)$$

## Алгоритм для расчета концентрации кокколитофорид по данным спутникового сканера MODIS

В качестве входных параметров использовались значения коэффициентов яркости моря  $R_{rs}$ , измеренные для двух спектральных каналов спутникового сканера MODIS: 488 и 555 нм.

Значения  $R_{rs}$  выражаются через оптические характеристики морской воды через безразмерный параметр  $X=b_b/(a+b_b)$ . Показатели поглощения  $a$  и рассеяния назад  $b_b$  представляются посредством малопараметрических моделей:

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_g(\lambda), \quad (6)$$

$$b_b = b_{bw} + b_{bp}, \quad (7)$$

$$b_{b\_coc} = K_{coc}(\lambda/555)^{-1.2} \cdot N_{coc}, \quad (8)$$

$$b_{b\_riv} = K_{riv} \cdot a_g \cdot (\lambda/555)^{-0.5}, \quad (9)$$

$$a_g(\lambda) = a_g \cdot \exp(-0.015 (\lambda - 440)), \quad (10)$$

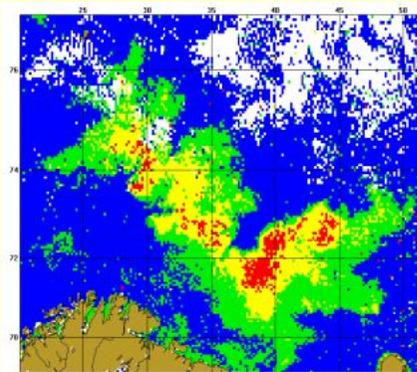
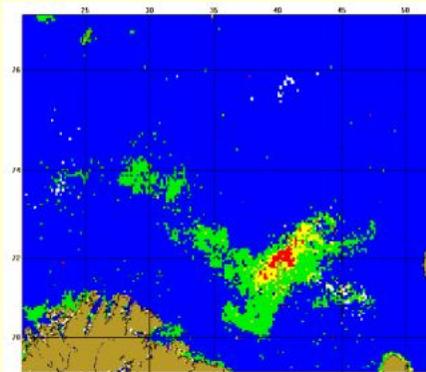
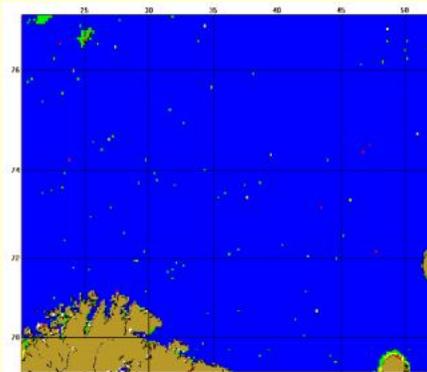
где  $a_w$  и  $b_{bw}$  – показатели поглощения и рассеяния назад чистой морской водой,  $b_{bp}$  – по формуле (5).

Используя измеренные значения  $R_{rs}(488)$  и  $R_{rs}(555)$  и формулы (5)-(10) решается система двух линейных уравнений с двумя неизвестными  $a_g$  и  $N_{coc}$

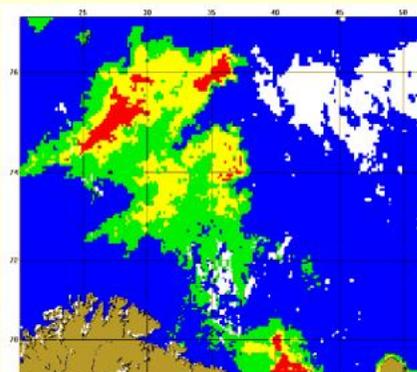
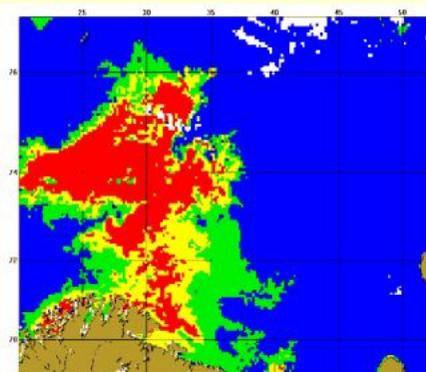
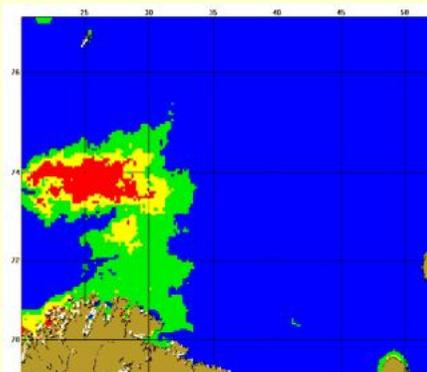
$$f_1(\lambda_i) a_g + f_2(\lambda_i) N_{coc} = b_b(\lambda_i), \quad i = 1, 2 \quad (11).$$

# Результаты применения разработанного алгоритма в Баренцевом море

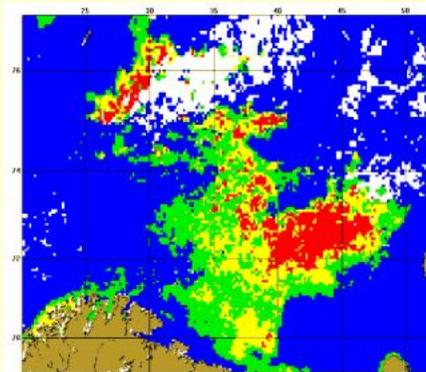
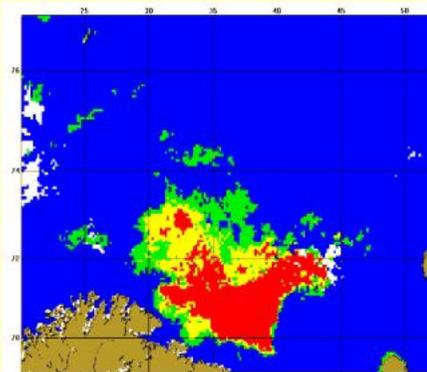
# Сезонная изменчивость КЦ в Баренцевом море



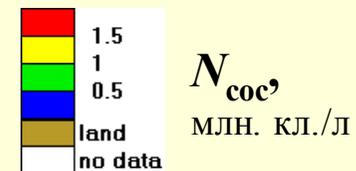
2000 г.



2004 г.



2007 г.

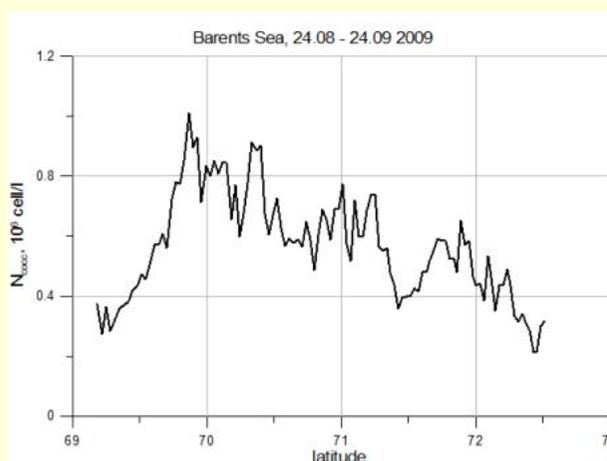
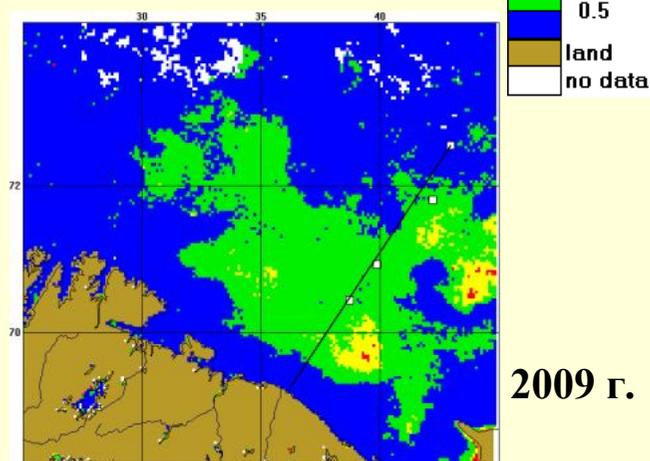
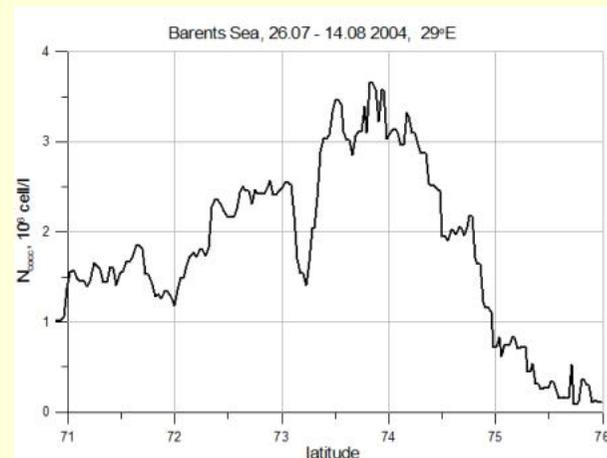
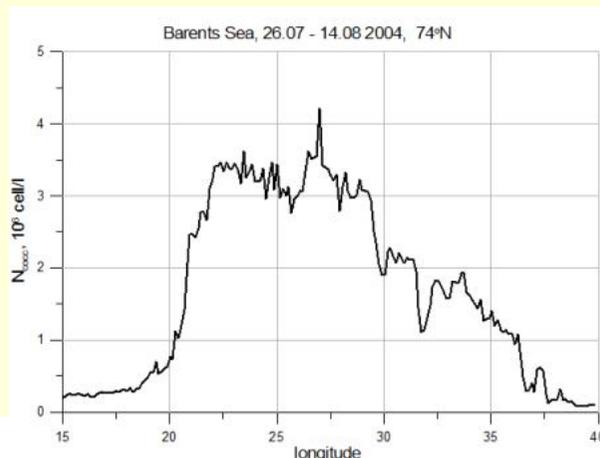
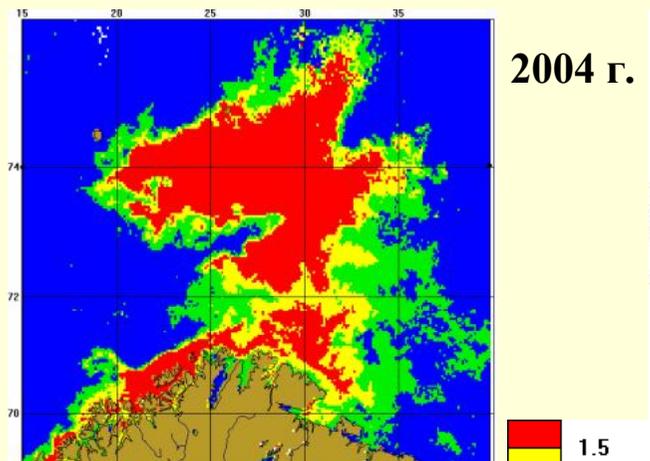


ИЮЛЬ

август

сентябрь

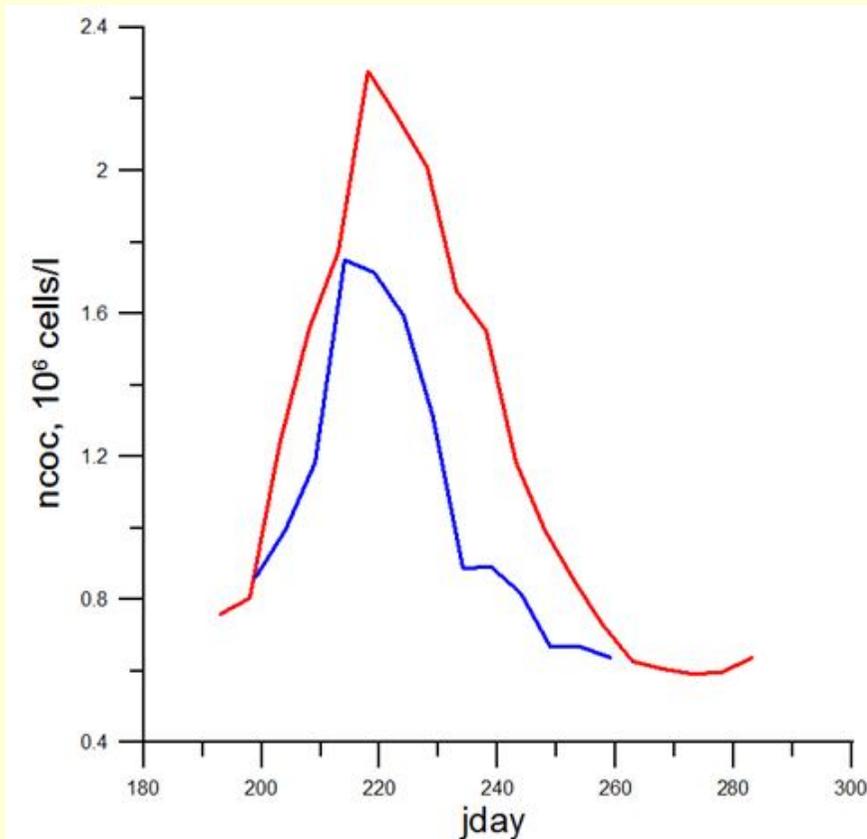
## Горизонтальная структура КЦ в Баренцевом море



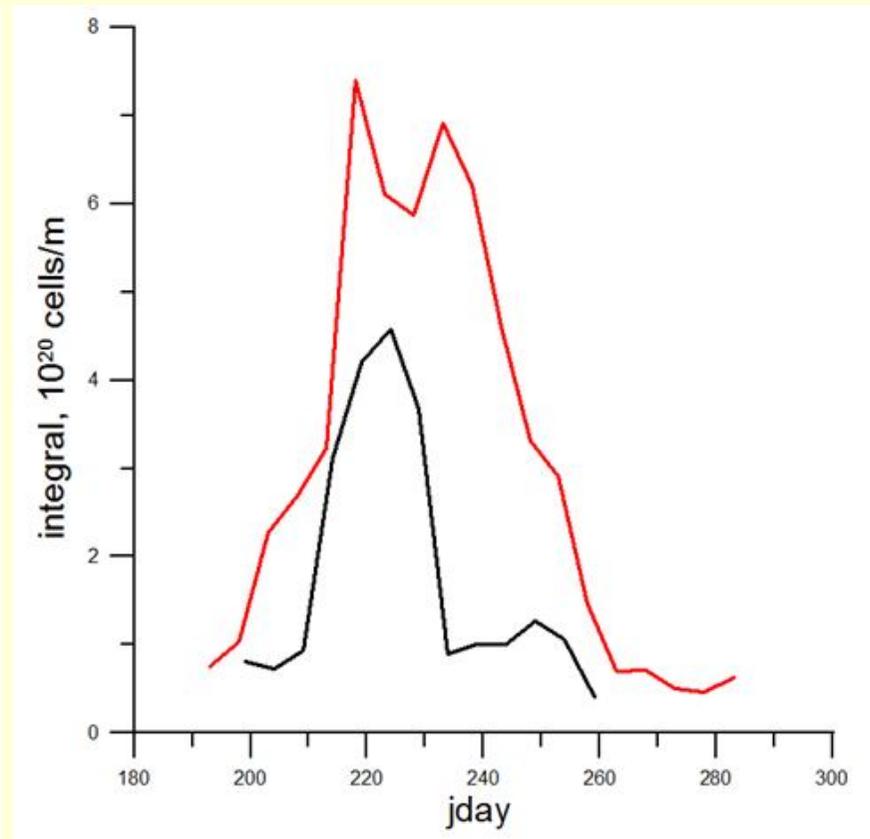
На графиках показаны изменения  $N_{\text{coc}}$  по 74° с.ш. и 29° в.д. (верхние графики) – 2004 г. и на разрезе по маршруту судна в 2009 г. (нижний график – см. карту).

На цветных картах показаны распределения величины концентрации кокколитофорид  $N_{\text{coc}}$  по данным спутникового сканера MODIS-Aqua, осредненные за период 26 июля-14 августа **2004 г.** (верхнее распределение) и 24 августа-24 сентября **2009 г.** (нижнее).

Циклы кокколитофоридных цветений в Баренцевом море в 2012 и 2008 гг. :  $N_{coc}$ ,  $10^6 \text{ cell/l}$  и суммарное количество клеток в метровом слое по площади цветения  $\Sigma$ ,  $10^{20} \text{ кл/м}$  ( $\Sigma = \int_S N_{coc}(\lambda, \varphi) dS$ )

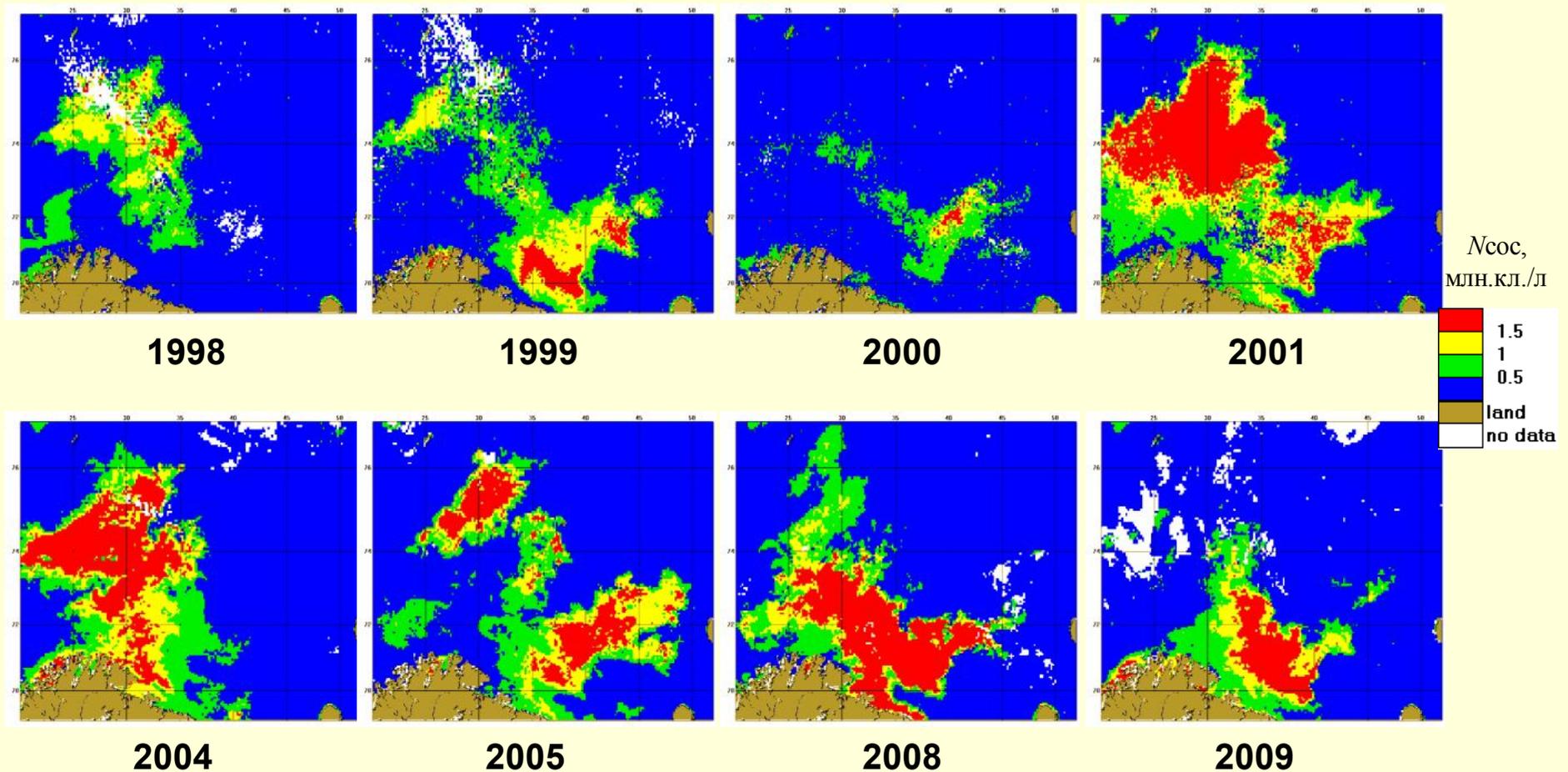


$N_{coc}$ ,  $10^6 \text{ cell/l}$   
 2012, red  
 2008, blue



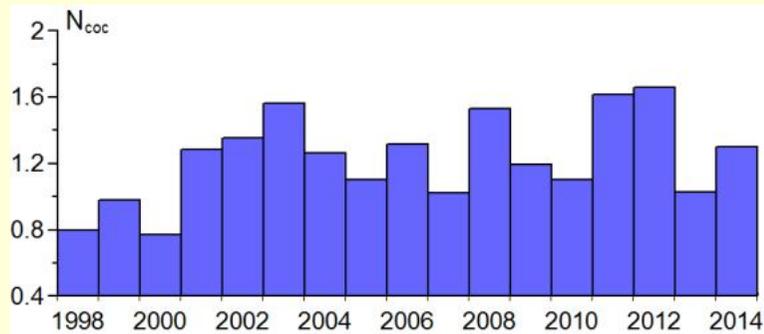
Total sum  $\Sigma$ ,  $10^{20} \text{ cell/m}$   
 2012, red  
 2008, black

## Межгодовая изменчивость

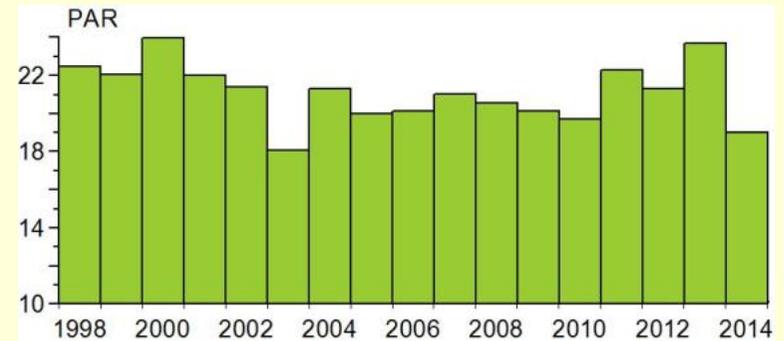


Представлены среднемесячные августовские распределения концентрации кокколитофорид  $N_{\text{coc}}$ , рассчитанные по данным спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua в 1998-2001, 2004, 2005, 2008, 2009 гг. посредством разработанного алгоритма.

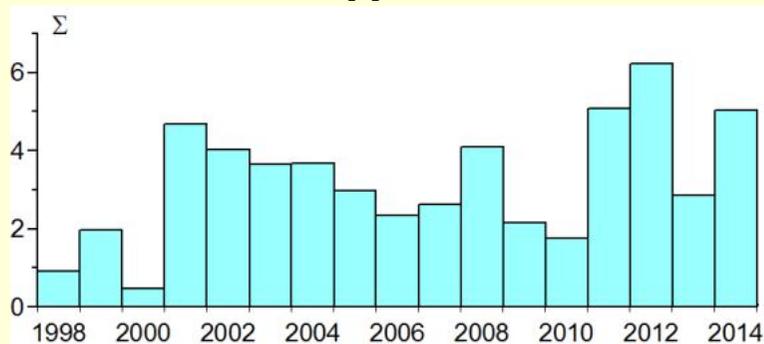
Изменения среднемесячных значений в августе 1998-2014 г. в Баренцевом море:  $N_{coc}$ ,  $10^6$ кл/л, суммарного количества клеток в метровом слое по площади цветения  $\Sigma$ ,  $10^{20}$  кл/м, SST, $^{\circ}$ C, PAR, Ein/ $m^2$  день, and  $W$ , м/с



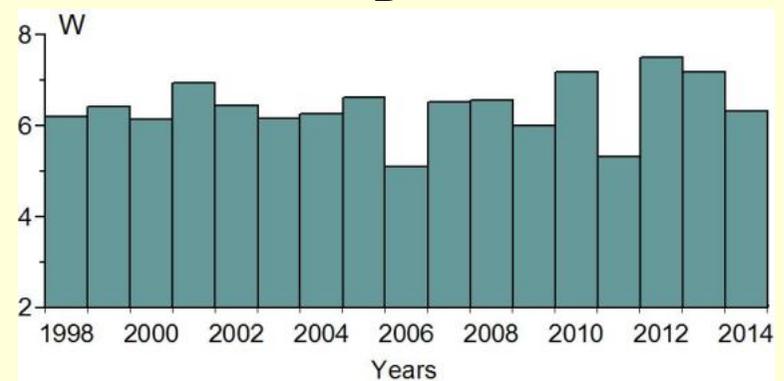
**A**



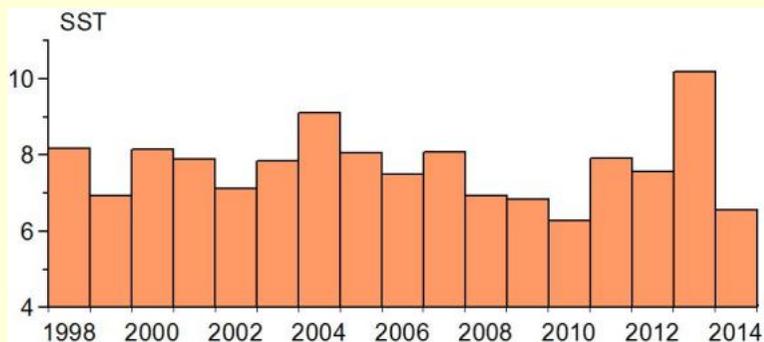
**D**



**B**



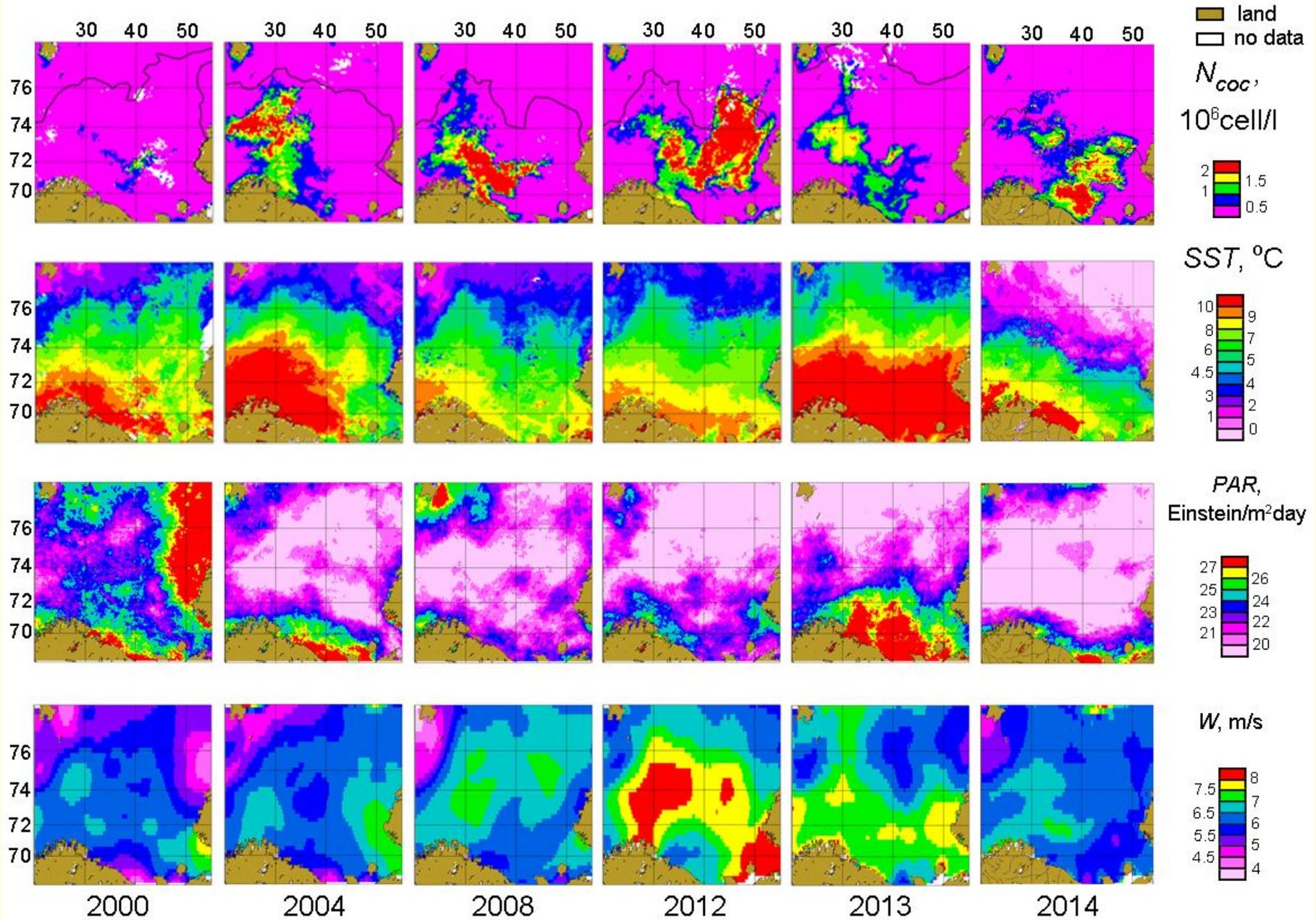
**E**



**C**

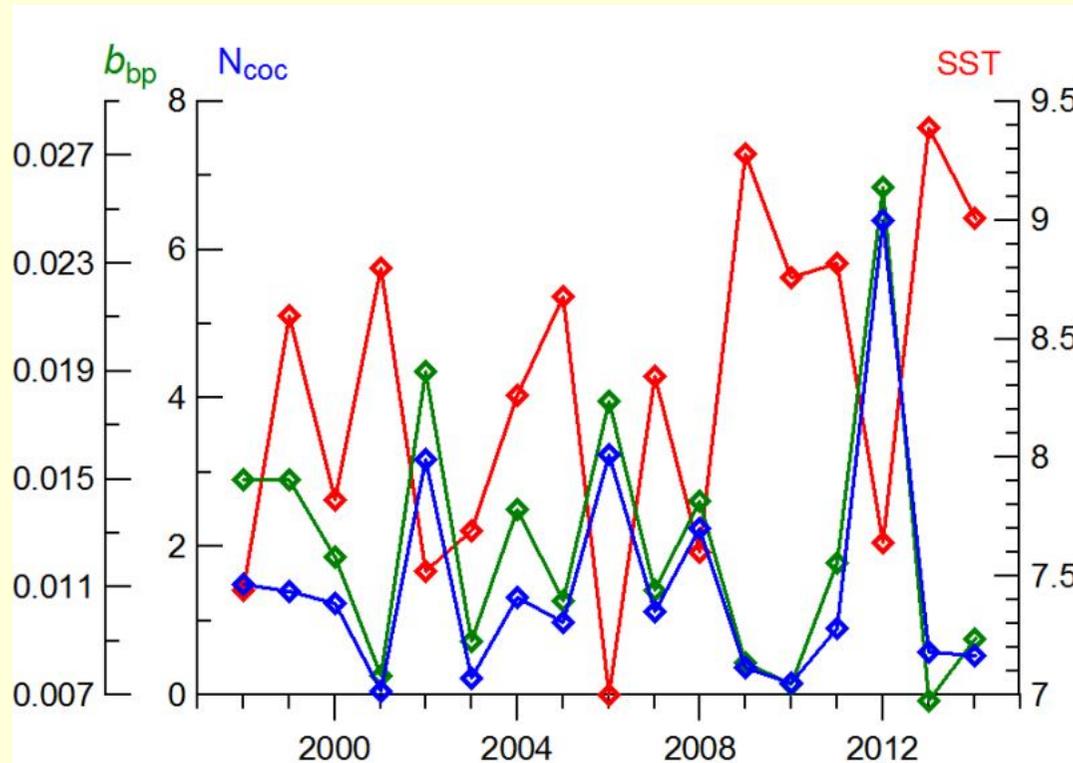
A,  $N_{coc}$ ; B, суммарное количество клеток;  
C, SST; D, PAR; E, W.

# Среднемесячные распределения в августе в разные годы $N_{COC}$ , SST, PAR и скорости ветра $W$ в Баренцевом море

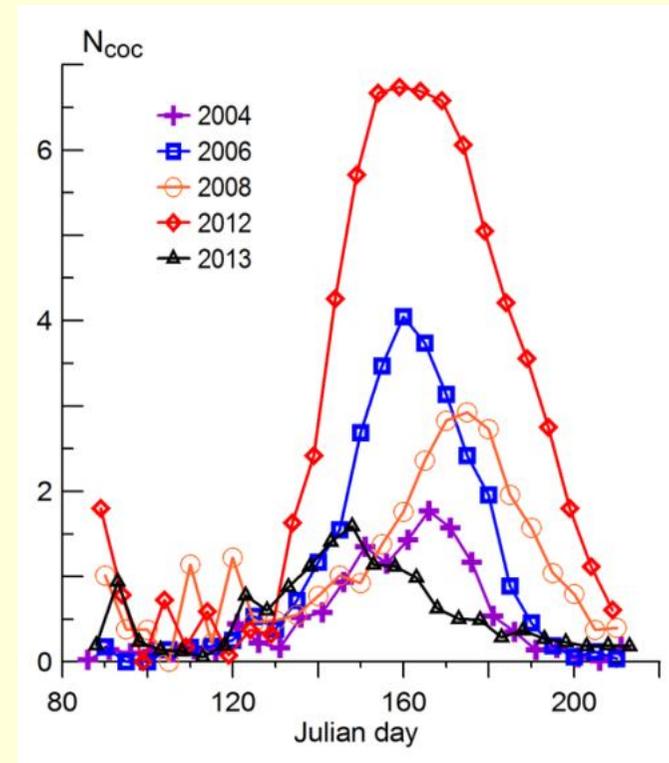


# Результаты применения разработанного алгоритма в Черном море

Межгодовые изменения среднемесячных значений концентрации клеток кокколитофорид  $N_{\text{coc}}$ ,  $10^6$  кл/л и показателя рассеяния  $b_{\text{bp}}$ ,  $\text{m}^{-1}$  в июне, в сравнении с изменениями температуры SST $^{\circ}\text{C}$  в феврале в восточной части открытого моря по данным сканера MODIS-Aqua (слева) и циклы Кокколитофоридных цветений в разные годы (справа)

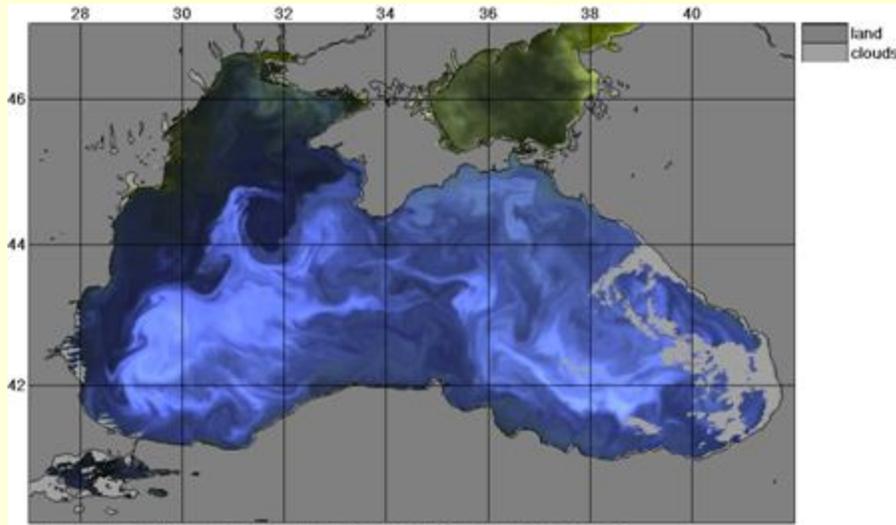


$N_{\text{coc}}$ , blue  
 $b_{\text{bp}}$ , green  
 SST, red

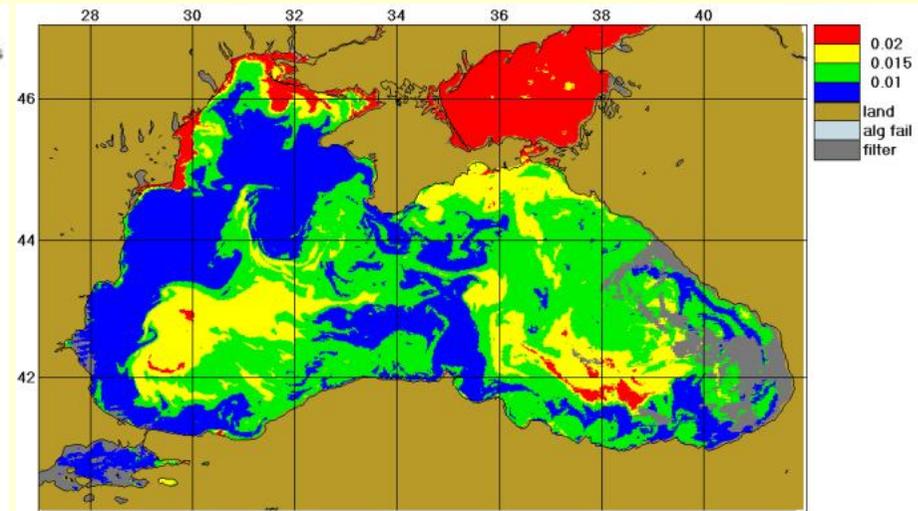


Изменения  $N_{\text{coc}}$ ,  $10^6$  кл/л  
 в течение цикла цветения  
 в разные годы

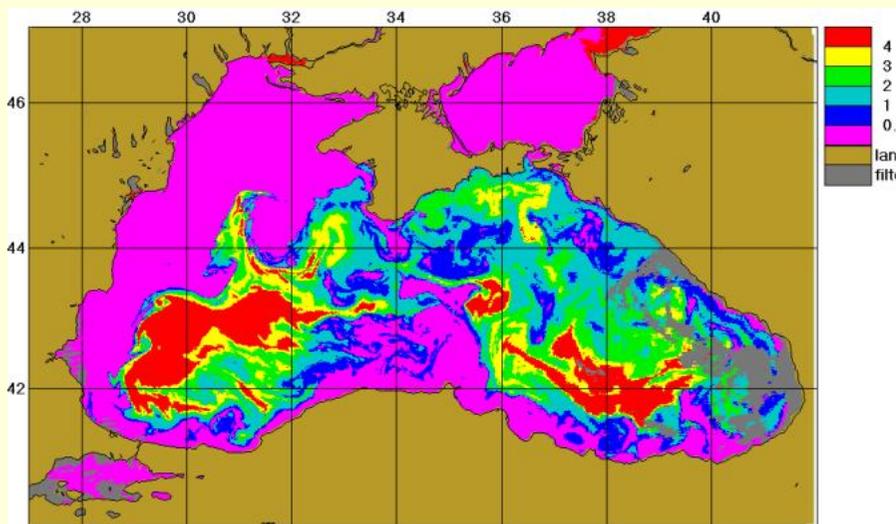
15 июля 2012 г.



А



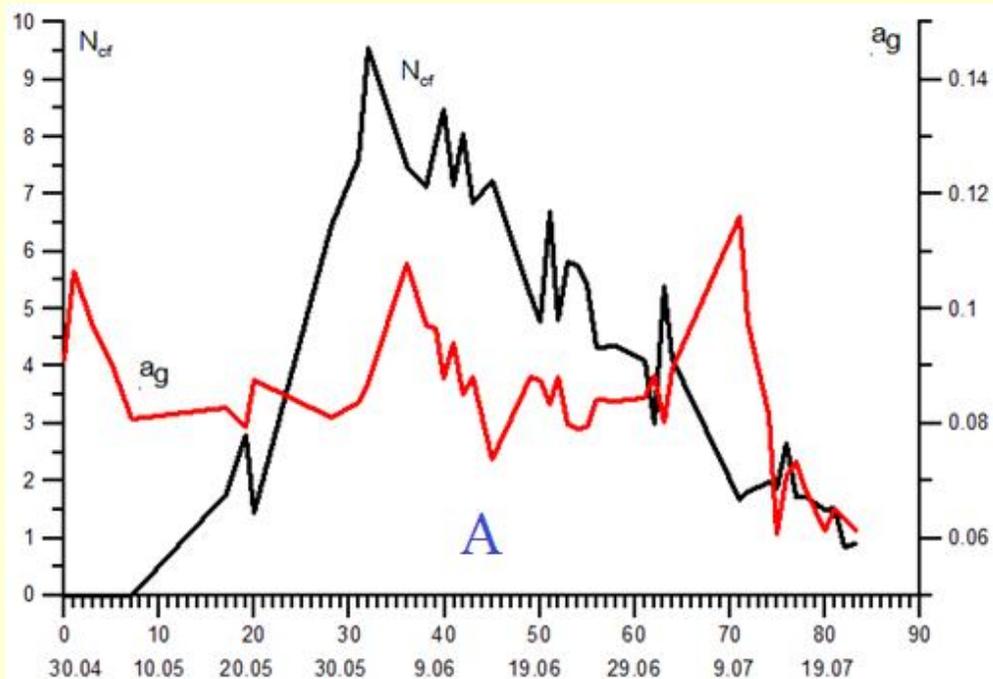
Б



В

Пространственные распределения,  
построенные  
по данным спутникового сканера MODIS-Aqua  
от 15 июля 2012 г.:

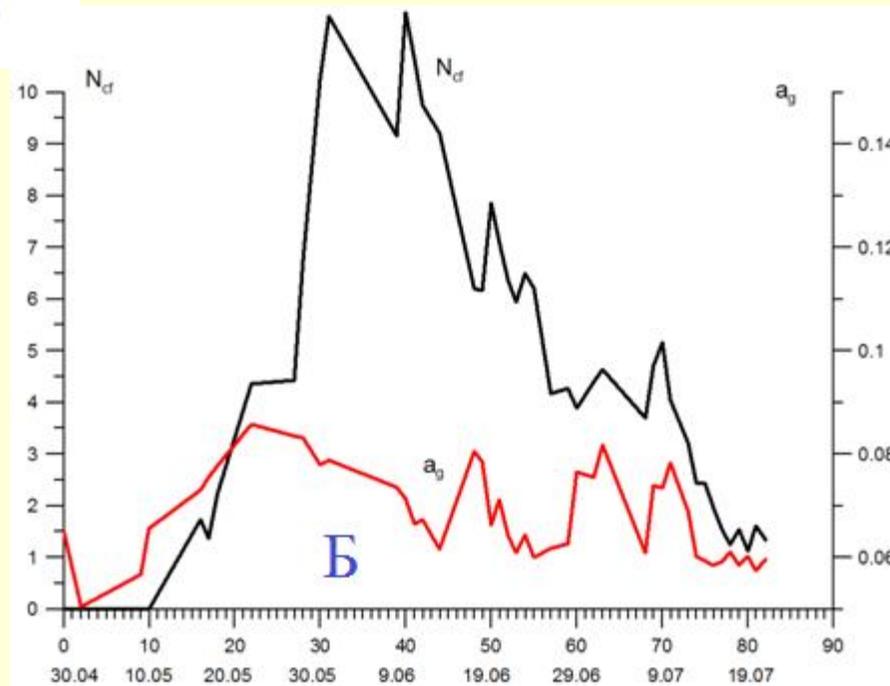
А, Изображение в видимом цвете,  
Б, Распределение показателя рассеяния назад  
взвешенными частицами  $bbp$ ,  
В, Распределение концентрации  
кокколитофорид  $N_{coc}$ .



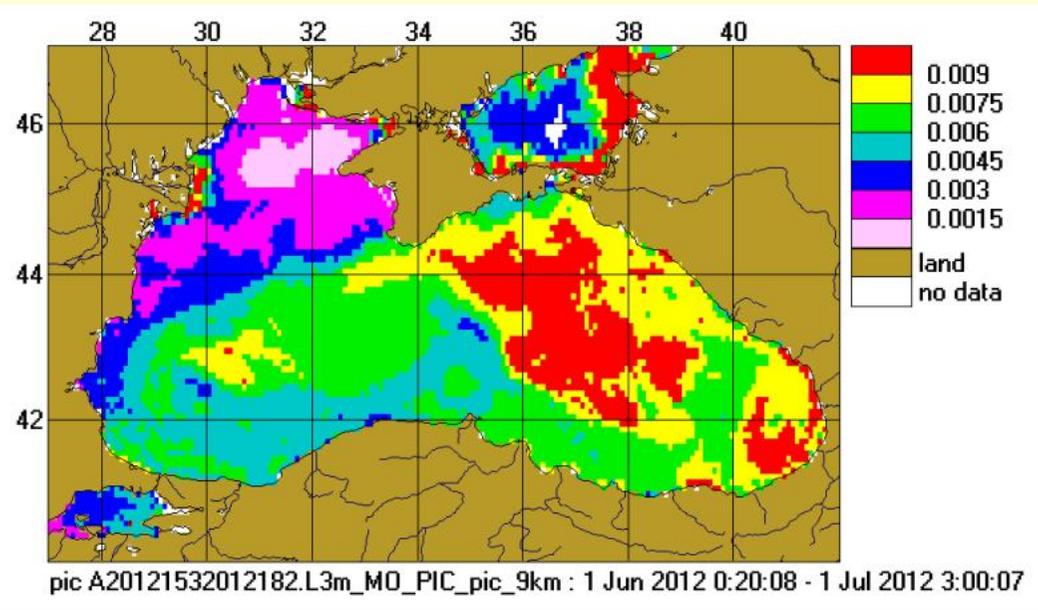
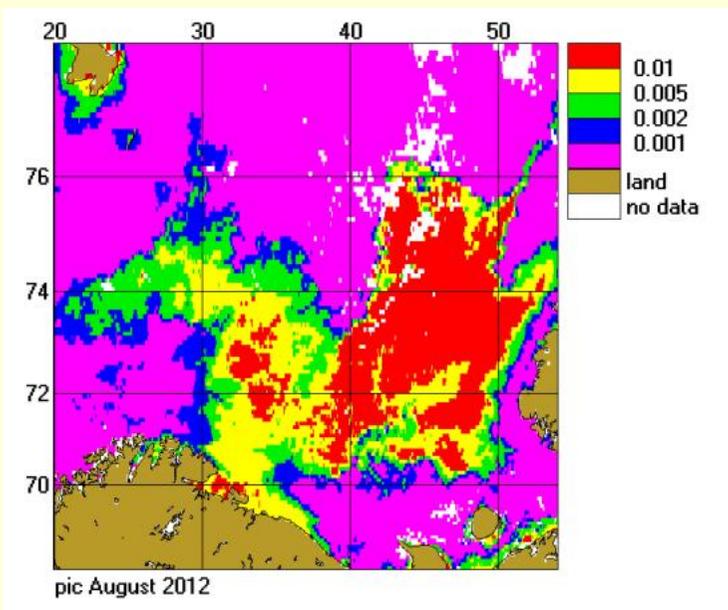
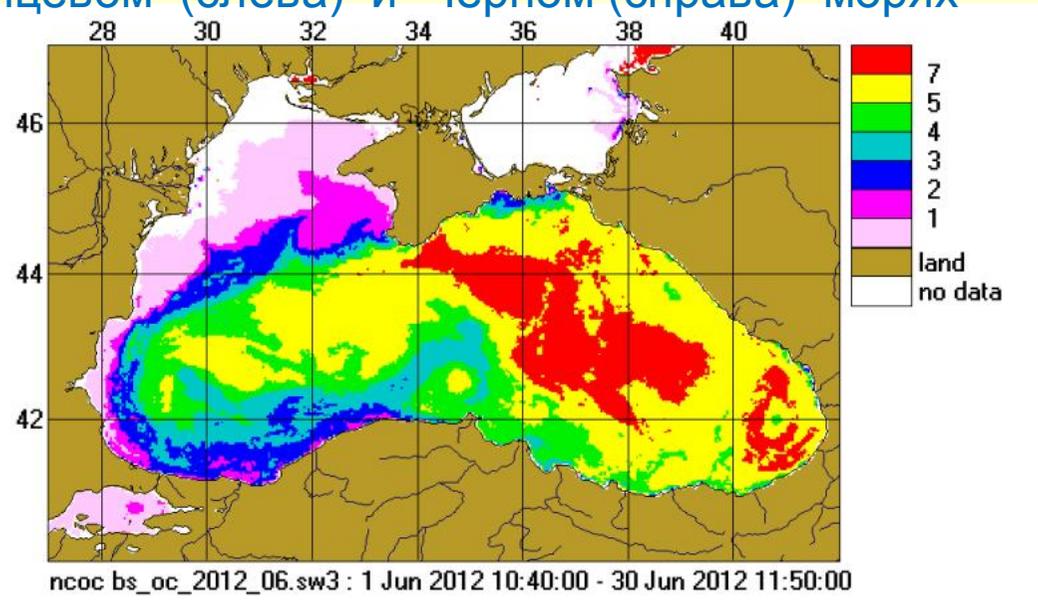
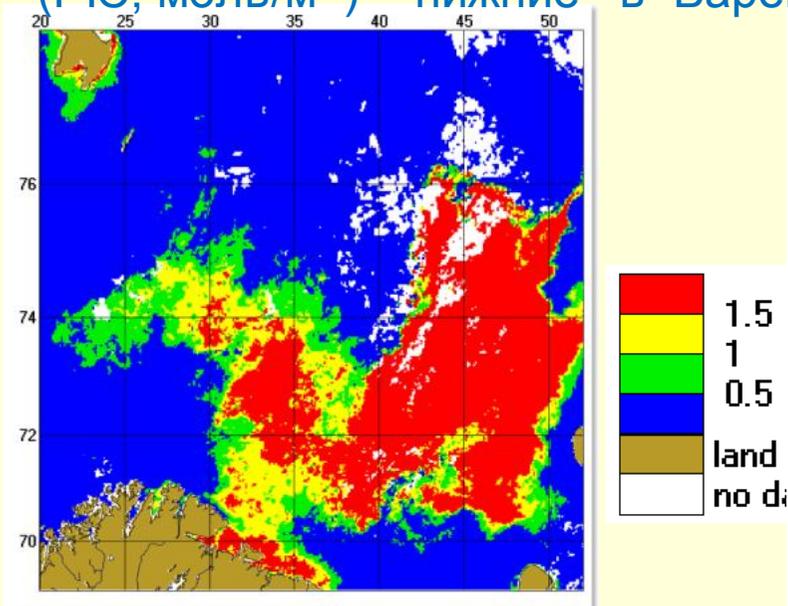
Изменение концентрации кокколитофорид  $N_{cf}$  (черные кривые) и показателя поглощения желтым веществом  $a_g$  (красные кривые) в период 1.05 – 23.07.2012 г.

А, 12-мильная прибрежная зона между Геленджиком и Новороссийском (среднее значение по району);

Б, точка в открытом море на расстоянии порядка 100 км от Геленджика (координатами ~43.8 с.ш., 37.7 в.д.).



Сравнение алгоритмов ИО РАН ( $N_{\text{сос}}$ ,  $10^6 \text{ кл/л}$ ) – верхние рисунки и НАСА (PIC,  $\text{моль/м}^3$ ) – нижние в Баренцевом (слева) и Черном (справа) морях



Баренцево море, август 2012

Черное море, июнь 2012

## Заключение

Главный результат выполненных исследований - разработка первых региональных алгоритмов для количественной оценки кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях по данным спутниковых сканеров цвета. Эти алгоритмы позволили получить интересные данные о пространственной и временной изменчивости КЦ в рассматриваемых морях, однако необходимо их дальнейшее усовершенствование. В числе задач, требующих решения. - улучшение параметризации КЦ (по-видимому, использование в качестве определяемого параметра концентрации кальцита, а не кокколитофорид), разработка алгоритма различения по спутниковым данным кокколитофоридных и других видов цветений, в первую очередь диатомовых. Решение этих задач возможно только путем проведения комплексных исследований, совмещающих спутниковые наблюдения и судовые измерения, при объединении усилий специалистов различных научных направлений (оптиков, биологов, геологов и др.). Сама проблема – интересная и практически важная - заслуживает этих усилий.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-17-00800)», предоставленного через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Спасибо за внимание!