Совместное использование данных спутниковых сканеров цвета и судовых измерений для изучения оптики поверхностного слоя российских морей

О.В.Копелевич, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Г. Москва

9-я Школа-семинар ИКИ РАН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.

### Вопросы:

- 1. Зачем нужно изучать оптику поверхностного слоя?
- 2. Какую информацию о поверхностном слое позволяют получить спутниковые сканеры цвета?
- 3. Зачем нужны одновременные судовые измерения?
- 4. Какие судовые измерения проводятся; аппаратура и методики.
- 5. Некоторые результаты совместного использования.

### Оптические характеристики морской воды

Главный фактор, определяющий распространение в воде светового излучения, как естественного, так и от искусственных источников.

Необходимы для расчета уровней ФАР («фотосинтетически активной радиации» на разных глубинах, одного из важнейших параметров, определяющих создание первичной продукции океана.

Требуются для оценки подводной видимости, конструирования и использования подводной теле-кино-фотоаппаратуры.

### Распространение лазерных импульсов на трассе космический аппарат (КА) - подводный объект



С помощью специально разработанной подводной скамьи выполнены натурные эксперименты в разных районах Мирового океана; лазерный сигнал, посланный с борта НИС, удалось зарегистрировать на глубине 320 м. В 1987 г. в Тихом океане был проведен спутниковый эксперимент; лазерный сигнал с КА был зарегистрирован на глубине 80 м.

Характеристики оптических свойств морской воды

Показатель преломления: m = n - i n';

Показатель поглощения:  $dF_a = -a Fdl; a = -dF_a / F dl,$ [M<sup>-1</sup>]; [M<sup>-1</sup>];  $dF_{\mathbf{b}} = -\mathbf{b} F dl; \quad \mathbf{b} = - dF_{\mathbf{b}} / F dl,$ Показатель рассеяния: [M<sup>-1</sup>];

Показатель ослабления:  $c = - dF_c/F \cdot dl = a + b;$ 

Показатель рассеяния в данном направлении, [м-1.ср-1]:  $d^{2}F_{h}(\theta) = -\beta(\theta) \cdot F \cdot dl \cdot d\Omega; \qquad \beta(\theta) = -d^{2}F_{h}(\theta) / F \cdot dl \cdot d\Omega,$ 

Индикатриса рассеяния:  $P(\theta) = \beta(\theta)/b;$ 

 $\int P(\theta) d\Omega = 1.$  $(4\pi)$ 

Показатель рассеяния вперед:  $b_f = 2\pi \int_{0}^{\pi/2} \beta(\theta) \sin\theta \, d\theta, \quad [M^{-1}];$ Показатель рассеяния назад:  $b_b = 2\pi \int_{\pi}^{\pi} \beta(\theta) \sin\theta \, d\theta;$  [M<sup>-1</sup>];



Закон Бугера:  $F(l) = F(0) e^{-cl}$ ;

Пропускание слоя:

$$T = F(l) / F(0) = e^{-\tau};$$

Вероятность выживания фотона (Single-scattering albedo):  $\omega_0 = b / c;$ 

Все вышеназванные характеристики зависят от длины волны излучения **л** :

$$\begin{split} & m(\lambda), \ n(\lambda), \ n'(\lambda), \ a(\lambda), \ b(\lambda), \ \beta(\theta, \lambda), \ b_{f}(\lambda), \ b_{b}(\lambda), \\ & g(\lambda), \ c(\lambda), \ \omega_{o}(\lambda). \end{split}$$

 $K = - \frac{dE}{E} \cdot dz = - \frac{d\ln E}{dz}; \qquad E(z) = E(0) \cdot e^{-Kz}.$ 

*K*(*λ*, *z*) – показатель диффузного ослабления потока излучения.

Оптические характеристики - индикатор важнейших процессов в океане.

Они зависят от количественного и качественного состава растворенного и взвешенного вещества в морской воде и содержат информацию об «оптически активных» компонентах этого вещества. В их числе:

окрашенные органические соединения, фитопланктон, бактерии, детрит, взвешенные частицы, выносимые в море реками и ветром, в результате абразии берегов, таяния льдов, вулканических извержений.

Оптические методы дают возможность отслеживать изменения этих компонентов и получать информацию о процессах, обусловливающих наблюдаемые изменения.

Преимущество оптических методов в том, что они позволяют получать информацию оперативно и без «насилия» над изучаемой средой, практически безынерционны и обеспечивают высокое пространственное разрешение, потенциально большой объем и разнообразие получаемой информации.

Световое излучение, в отличие от микроволнового и звукового, с малыми потерями проходит через морскую поверхность и проникает в водную толщу; это позволяет проводить исследования подповерхностного слоя океана дистанционно, с борта судна, авианосителей, со спутников.

### Малопараметрические модели оптических свойств

Малопараметрическая модель спектрального поглощения  $a(\lambda)$ учитывает поглощение окрашенным органическим («желтым») веществом  $a_y(\lambda)$ , пигментами фитопланктона  $a_{ph}(\lambda)$  и чистой водой  $a_w(\lambda)$ :

$$a(\lambda) = a_y(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_w(\lambda).$$

<u>Малопараметрическая модель</u> спектральных зависимостей  $b(\lambda)$  и  $b_{\rm b}(\lambda)$ :

 $b(\lambda) = b_{sw}(550) \cdot (\lambda/550)^{-4.2} + b_{p}(550) \cdot (\lambda/550)^{-n}$ 

где *b*<sub>p</sub>(550) (или *b*<sub>bp</sub>(550)) - показатель рассеяния взвешенными частицами (или показатель рассеяния назад взвешенными частицами) для длины волны 550 нм; *п* зависит от типа вод.

#### Global Environmental Satellite Observation Network



### CZCS Coastal Zone Colour Scanner



AGENCY: NASA (USA) SATELLITE: Nimbus-7 (USA) OPERATING DATES: 24/10/78 - 22/06/86 SWATH: 1556 km RESOLUTION: 825 m # OF BANDS 6 SPECTRAL COVERAGE: 433-12500 nm Спутниковый сканер цвета SeaWiFS на спутнике SeaStar (OrvView) (август 1997 – декабрь 2011)



Figure 2. SeaStar satellite with its solar panels deployed.



### Спутник Sentinel-3А успешно выведен на орбиту



OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) – сканер цвета океана и суши нового поколения, который должен продолжить многолетнюю серию наблюдений известного сканера MERIS, работавшего на борту европейского спутника ENVISAT. 21 спектральный канал (MERIS -15), пространственное разрешение – 300 м, минимизируется влияние солнечного блика.

Европейский космический аппарат Sentinel-3А успешно выведен на орбиту (высота 800 км) российской ракетой -носителем «Рокот». Пуск состоялся с космодрома Плесецк 16 февраля 2016 г. в 20:58 по московскому времени.

9-я Школа-семинар ИКИ РАН, Таруса, 12-16 апреля 2018г.

Зарубежные и российские спутники с аппаратурой для океанологических исследований, действующие и планируемые на период 2013-2025 гг. (из книги «The Earth Observation Handbook. Special Edition for Rio+20. Updated for 2014. CEOS – ESA»)

Назначение	Общее число	Российские спутники	Примечания
Многоцелевая аппаратура	64	8	«Метеор-М» №№ 1-2, 2.1-2.2, 3; «Метеор-МР» №№ 1-3
Температура поверхности моря	83	11	8 вышеуказанных + «Электро-Л» №№ 2 и 3 и «Арктика».
Соленость	4	-	Российский прибор «Зонд-ПП» вышел из строя в июне 2013 г.
Приводный ветер	63	8	См. раздел «Многоцелевая аппаратура»
Топография поверхности	31	-	-
Состояние поверхности моря	17	-	Не указаны два спутника подсистемы «Арктика-Р» с радиолокаторами
Биопродуктивность (сканеры цвета)	30	1	«Метеор-М» №3 со сканерами цвета ОСЅ и береговой зоны CZS.

### Первый геостационарный сканер цвета GOCI

запущен на спутнике COMS 27 июня 2010 г. с космодрома Куру (Французская Гвиана)

GOCI	Geostationary Ocean Color Imager				
Satellites	COMS 1 and 2				
Status	<b>Being integrated</b> – To be utilised in the period 2009 to ~ 2021				
Mission	Ocean colour and aerosol				
Instrument type	8-channel VIS/NIR radiometer				
Scanning technique	Pushbroom, 6000 pixel/line (3700 useful), swath 1420 km				
Coverage/cyc le	Area of 2500 km x 2500 km, hourly in daylight				
Resolution (s.s.p.)	500 m IFOV				

## Сравнение распределений концентрации хлорофилла, построенным по данным MODIS-Aqua и GOCI



### LandSat-8

Выведен на орбиту 11 февраля 2013 года. На борту два набора инструментов: <u>Operational Land Imager</u> (OLI) и <u>Thermal InfraRed Sensor</u> (TIRS).

Спутник рассчитан на срок активного существования в 5.25 лет, однако запас топлива позволяет использовать его до 10 лет.

Спектральный канал	Длины волн, мкм	Разреше- ние
Канал 1 — Побережья и аэрозоли (Coastal / Aerosol, New Deep Blue)	0.433 — 0.453	30 м
Канал 2 — Синий (Blue)	0.450 — 0.515	30 м
Канал 3 — Зелёный (Green)	0.525 - 0.600	30 м
Канал 4 — Красный (Red)	0.630 — 0.680	30 м
Канал 5 — Ближний ИК (Near Infrared, NIR)	0.845 - 0.885	30 м
Канал 6 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2)	1.560 — 1.660	30 м
Канал 7 — Ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 3)	2.100 - 2.300	30 м
Канал 8 — Панхроматический (Panchromatic, PAN)	0.500 - 0.680	15 м
Канал 9 — Перистые облака (Cirrus, SWIR)	1.360 — 1.390	30 м
Канал 10 — Дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR1)	10.30 — 11.30	100 м
Канал 11 — Дальний ИК (Long Wavelength Infrared, TIR2)	11.50 — 12.50	100 м

#### Распространение стока Лены в море Лаптевых



Слева: распределение показателя поглощения желтого вещества по данным MODIS-Aqua за период 6 -17 сентября 2015 г., справа - изображение от 8 сентября 2015 г. со спутника Landsat 8. Хорошо видна структура речного стока Лены – множество сливающихся проток, несущих теплые, пресные и мутные воды (Глуховец, Артемьев, 2017).

### Достоинства сканеров цвета

- Только излучение видимой области спектра способно проходить с малыми потерями(и выходить обратно) через поверхность раздела атмосфера-океан.
- Излучение, вышедшее из водной толщи, содержит информацию о характеристиках подповерхностного слоя океана и процессах, происходящих в этом слое.
- Спутниковые сканеры цвета, наряду с ИК-радиометрами, наиболее эффективны с экономической точки зрения.
- Данные спутниковых сканеров цвета, также как ИК радиометров, можно совершенно бесплатно получать через Интернет в течение суток после измерений.
- Полоса обзора большинства спутниковых сканеров цвета составляет порядка 1500 км при пространственном разрешении 250 м 1 км.

Недостаток: облачность – непреодолимое препятствие.

## Основные характеристики океана и атмосферы, рассчитываемые по данным спутниковых сканеров цвета

Параметр	Использование				
Спектральный коэффициент	Пространственно-временная изменчивость поверхностного слоя (распространение речных стоков, примесей, мезомасштабные				
	вихри, фронтальные зоны и т.п.)				
Концентрация	Биомасса фитопланктона; расчет первичной продукции				
хлорофилла					
Характеристики	Пропускание солнечной и уходящей радиации, микрофизика				
атмосферного аэрозоля	облаков.				
Параметры облаков	Важнейший метеорологический фактор				
Спектральная облученность	Важный фактор, определяющий первичную продукцию и тепловой				
поверхности	баланс океана				
Показатель вертикального	Расчет светового режима в водной толще, альбедо океана				
ослабления подводной	и объемное поглощение солнечной энергии в верхнем слое				
облученности					
Первичная продукция	Биоресурсы океана, глобальные потоки углерода в системе				
	атмосфера-океан				
Показатель поглощения	Поглощение света в воде, содержание окрашенной органики,				
окрашенного органического	качество воды в прибрежной зоне, параметр мониторинга				
вещества					
Показатель рассеяния	Альбедо водной толщи, содержание взвеси, параметр мониторинга				
морской взвеси*					

#### Примеры результатов, полученных со сканеров цвета



Каспийское море. Цветение Nodularia Пылевая буря. Атлант. океан

Атлантический океан. Хл. Май 1998.



Распределения поверхностной температуры (слева) и концентрации хлорофилла в западной части Атлантического океана по данным сканера MODIS на ИСЗ «Aqua» 18 апреля 2005 г.

Две возможности использования данных спутниковых сканеров цвета:

- 1. Исследования относительных изменений биооптических характеристик вод поверхностного слоя;
- 2. Определение их абсолютных величин.

Во втором случае предъявляются более жесткие требования к точности измерений и алгоритмам обработки спутниковых данных - атмосферной коррекции и биооптическим алгоритмам. Необходимы региональные алгоритмы, учитывающие особенности вод исследуемого региона, которые можно разработать только На основе данных натурных измерений в этом регионе. Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



«Истинный» цвет океана обусловлен спектральным составом, излучения, выходящего из водной толщи. Спектральная яркость выходящего излучения определяется оптическими свойствами морской воды, которые зависят от количественного и качественного состава содержащегося в морской воде вещества. «Видимый» спутниковым датчиком цвет обусловлен в значительной степени влиянием атмосферы и отражением от поверхности.

9-я Школа-семинар ИКИ РАН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.

### Составляющие яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы

L<sub>t</sub>(λ<sub>i</sub>) – 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.

### Что «видят» спутниковые сканеры цвета?



MODIS-Aqua, 7 ноября 2006г.

SeaWiFS, 20 марта 2001г.

### Два главных этапа обработки данных \спутниковых сканеров цвета

- Атмосферная коррекция определение спектральных значений яркости L<sub>W</sub>(λ<sub>i</sub>) излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости L<sub>t</sub>(λ<sub>i</sub>) восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком.
- Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости L<sub>w</sub>(λ<sub>i</sub>) излучения, вышедшего из водной толщи. В случае мелкого моря с учетом отражения ото дна.

# 0 # 1 # 2 # 3 # 4	1024 – 1064 nm 855 – 890 nm 744 – 757 nm 704 – 713 nm 550 – 565 nm	n width (poss width (poss width width width	n 30 nm ssible width 40 nm) 20 nm ssible width 35 nm) 14 nm 10 nm 10 nm		Требования к спектральным каналам спутникового сканера цвета				
#5	485 – 495 nm	width	10 nm						
#6	438 – 448 nm	width	10 nm						
#7	407 – 417 nm	width	10 nm	C1	= Channels	1, 2, 4, 5			
Minimum requirements for an Operational Ocean-Colour Sensor for the Open Ocean. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No.1. IOCCG, Dartmouth, Canada, 46 pp. 1998.			C2 C3 C4 C5 C6 C7	e = Channels = Channels = Channels = Channels = Channels = Channels	1, 2, 4, 5, 6 1, 2, 4, 5, 6, 7 1, 2, 3, 4, 5, 6 0, 1, 2, 4, 5, 6 1, 2, 3, 4, 5, 6 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 0, 1, 2, 3, + <i>n</i> channels in the visible part of the spectrum				

<u>Пример вкладов разных составляющих в суммарную яркость восходящего</u> излучения  $L_t(\lambda_i)$  на верхней границе атмосферы:

 $L_r(\lambda_i)$  – рэлеевское рассеяние;  $L_a(\lambda_i)$  – аэрозольное расеяние (включая взаимодействие рэлеевского и аэрозольного рассеяния);

 $TL_g(\lambda_i)$  – солнечный блик;  $tL_{wc}(\lambda_i)$  – диффузное отражение пеной;

 $tL_w(\lambda_i)$  – излучение, вышедшее из водной толщи.

Данные SeaWiFS для района около Гавайских островов, 16 июля 1998;

даны значения яркости в мВт/см<sup>2</sup>/мкм/ср.

$\lambda_i$ , нм	412	443	490	510	555	670	765	865
$L_t(\lambda_i)$	9.134	8.234	6.220	5.218	3.952	2.344	1.484	1.236
$L_r(\lambda_i)$	6.739	5.625	3.775	3.123	2.114	0.836	0.361	0.206
$L_a(\lambda_i)$	0.449	0.533	0.578	0.568	0.565	0.505	0.377	0.342
$TL_g(\lambda_i)$	0.634	0.830	0.990	0.997	1.032	0.978	0.742	0.685
$tL_{wc}(\lambda_i)$	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001
$tL_{w}(\lambda_{i})$	1.311	1.246	0.890	0.516	0.232	0.023	0.002	0.001

## Необходимые условия получения качественных геофизических продуктов:

- 1. Выполнение необходимых требований к характеристикам спектральных каналов спутникового датчика;
- 2. Обеспечение радиометрической точности измерений не хуже 5% для определения абсолютных значений и 1% для относительных изменений;
- 3. Контроль калибровки спутникового датчика в период работы на орбите посредством бортовых и приводных измерений;
- 4. Разработка алгоритмов атмосферной коррекции и биооптических алгоритмов, адаптированных к особенностям прибора и его техническим характеристикам;
- Обеспечение необходимой дополнительной информации для обработки спутниковых данных (данные о содержании озона, атмосферном давлении, относительной влажности, скорости ветра);
- Верификация алгоритмов по данным натурных измерений для различных гидрометеорологических и океанологических условий; оценка точности рассчитываемых геофизических продуктов.

Организация получения, обработки и верификации данных



Fig. 2. SeaWiFS Project schematic showing major elements of shore and at-sea data processing.

## Оптический буй МОВҮ для контроля калибровки Спутникового датчика и верификации алгоритмов





#### Местоположение МОВУ:

13 морских миль от острова Ланаи на глубине 1200 м.

Кружок на врезке показывает «блуждание» буя относительно точки его закрепления.

#### **AERONET - AErosol RObotic NETwork**



AERONET – это сеть станций, на которых установлены сканирующие спектрорадиометры, измеряющие в автоматическом режиме спектральную яркость прямого и рассеянного солнечного излучения.

Полученные данные позволяют рассчитывать спектральную оптическую толщину аэрозоля и распределение по размерам аэрозольных частиц. Используются для непрерывного исследования свойств аэрозоля и верификации атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета.



Плавающий спектрорадиометр – основной прибор для верификации алгоритмов обработки спутниковых данных при подспутниковых экспериментах



Измеряет абсолютные величины спектральной облученности над поверхностью моря и яркости излучения, выходящего из водной толщи, непосредственно под поверхностью. Измерения проводятся на расстоянии порядка 50 м от судна, чтобы избежать влияния корпуса судна на измерения.Спектральный диапазон - 390-700 нм; спектральное разрешение - 2.5 нм; точность измерений - 5%. Региональный алгоритм коррекции ошибок атмосферной коррекции для Баренцева моря (Kopelevich et al. 2003)



Ст. 1131 в Баренцевом море (69.77N,56.28E): кружочки – данные измерений in situ; треугольники – атмосферная коррекция посредством алгоритма SeaWiFS; ромбики – коррекция ошибок атмосферной коррекции. Алгоритм основан на данных измерений в Баренцевом море спектрального коэффициента яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$ посредством плавающего спектрорадиометра. Для массива измеренных спектров рассчитано разложение по собственным векторам их ковариационной матрицы и построена система функций, позволяющая рассчитывать спектральные значения  $L_{wc}(\lambda_i)$  по спутниковым значениям этой величины лишь для двух каналов (у сканера SeaWiFS - 510 и 555 нм).

### Биооптические алгоритмы



# Валидация алгоритма расчета концентрации хлорофилла по данным натурных измерений

SeaWiFS

-160°

-120°

-80°

0°

-40°

160°

0°

80°

40°

120°


# Эмпирические (регрессионные) алгоритмы определения концентрации хлорофилла по данным сканеров цвета SeaWiFS и MODIS OC4v4 (SeaWiFS):



Сравнение значений концентраций хлорофилла *a*, рассчитанных по данным спутниковых сканеров цвета SeaWiFS (слева) и MODIS-Aqua (справа) с измеренными на пробах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии HPLC



# Верификация спутникового алгоритма определения концентрации хлорофилла

10.00



12-16 апреля 2018 г.

### Валидация спутниковых алгоритмов



Региональный алгоритм ИО РАН

Стандартный алгоритм SeaWiFS

Fig.1 Среднемесячные распределения концентрации хлорофилла в Баренцевом море, рассчитанные по стандартному алгоритму SeaWiFS (справа) и по алгоритму ИОРАН, верифицированному по данным натурных измерений (слева). Август 2001 г.

9-я Школа-семинар ИКИ Р АН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.

St.	Coordinates	Chl Meas.	Chl Auth.	Chl SeaWiFS	β	
1088	70.42 N, 47.58E	0.16	0.25	0.63	5.7	
1090	70.18N, 52.42E	0.5	0.77	3.3	12.7	1
1095	68.97N, 58.47E	0.79	0.21	10.4	114	Park
1112	69.09N, 58.29E	0.42	0.62	9.5	36.7	lecro
1125	69.50N, 57.25E	0.23	0.06	2.8	76.2	ζ.
1126	69.67N, 57.24E	0.18	0.19	2.7	33.3	pasi
1157	70.54N, 52.79E	0.25	0.17	1.09	15.0	
1174	69.25N, 41.00E	1.39	1.03	1.0	2.3	
1183	71.50N, 41.00E	0.38	0.32	0.81	3.8	
1196	74.75N, 41.00E	0.13	0.14	0.28	3.6	
1209	78.00 N, 41.00E	0.16	0.17	0.25	2.8	
1281	76.00N, 42.27E	0.27	0.41	0.44	2.2	
Pechora Basin			48%	12 times		
out of it			27%	2 times		

### Баренцево море

Сравнение между значениями концентрации Chl, ИЗМЕРЕННЫМИ (meas.), рассчитанными по региональному (Auth.) и стандартному (SeaWiFS) алгоритмам

Сравнение распределений концентрации хлорофилла по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS 01.08.2006, рассчитанных посредством стандартного (слева) и нового регионального (справа) алгоритмов



### Карское море



Изменения концентрации хлорофилла по маршруту НИС «Академик Мстислав Келдыш» в 2011 г. Точечная линия – данные прямых определений; сплошная – расчет по спутниковым данным посредством нового регионального алгоритма; пунктир – посредством стандартного алгоритма MODIS.

9-я Школа-семинар ИКИ РАН, Таруса, 12-16 апреля 2018

Региональные алгоритмы расчета концентрации хлорофилла и взвеси по спутниковым данным для Карского моря



Среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла «а» (верхние карты) и взвеси (нижние) в Карском море в сентябре 2007 (слева) и 2011 (справа), рассчитанные по данным сканера MODIS-Aqua посредством нового регионального алгоритма.

# Регрессионные алгоритмы

Для определения концентрации хлорофилла использовались регрессионные алгоритмы, разработанные на основе данных натурных измерений. По этим данным были рассчитаны уравненияе регрессии между концентрацией хлорофилла  $C_{xn}$  и отношением нормализованных яркостей  $L_{wn}(510)/L_{wn}(555)$  для спектральных каналов SeaWiFS 510 и 555 нм, где рассчитанные нормализованные яркости  $L_{wn}(\lambda)$  совпадают с измеренными *in situ* с приемлемой точностью

 $ChI = A [L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-B}.$ 

Для Баренцева моря А=0.34, В=1.39; для Черного – 0.88 и 2.26.

Для Северного и Среднего Каспия – 0.38 и 3.65.

 $Chl = 0.34 [L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-1.39}.$ 

Chl= 0.88  $[L_{WN}(510)/L_{WN}(555)]^{-2.26}$ .

Алгоритм для расчета показателя рассеяния назад взвесью основан на расчете показателя рассеяния назад морской воды *b<sub>b</sub>*(555) через значения параметра *X*(555) и показателя диффузного ослабления *K<sub>d</sub>*(555) через отношение *L<sub>wn</sub>*(510)/*L<sub>wn</sub>*(555) для каналов 510 и 555 нм.

# ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКИЙ БИО-ОПТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ

Основан на использовании аналитической формулы для коэффициента яркости водной толщи  $\rho(\lambda)$  и малопараметрических моделей для показателей поглощения  $a(\lambda_i)$  и рассеяния назад  $b_b(\lambda_i)$  морской воды:

$$\begin{split} \rho(\lambda) &= \pi \left( 0.070 + 0.155 \ X^{0.752} \right) \cdot X, \quad \text{где } X = b_b(\lambda_i) / [ \ a(\lambda_i) + b_b(\lambda_i) ]; \\ a(\lambda) &= exp[ - S(\lambda - 440)] \cdot a_y(440) + a^*_{ph}(\lambda) \cdot a_{ph}(440) + a_w(\lambda); \\ b_b(\lambda) &= 0.5b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(550) \cdot (550/(\lambda))^n; \end{split}$$

где  $a_w(\lambda)$  и  $b_{bw}(\lambda)$  - известные показатели поглощения и обратного рассеяния чистой морской водой;  $a_{ph}(\lambda)$  - спектральное поглощение пигментами фитопланктона;  $a_g(\lambda)$  - поглощение растворенным органическим веществом (POB), в которое включено также поглощение детритом;  $b_{bp}(\lambda)$  - показатель обратного рассеяния взвешенными частицами. S и n – наклоны спектральных кривых поглощения «желтым веществом» и рассеяния назад взвешенными частицами.

Вообще говоря 5 неизвестных:  $a_v(440)$ ,  $a_{ph}(440)$ ,  $b_{bp}(550)$ ; S, n.

Метод наименьших квадратов

$$\sum_{i} \left\{ X(\lambda_i) \cdot b_b(\lambda_i) / [a(\lambda_i) + b_b(\lambda_i)] \right\}^2 = \min;$$

 $\mathbf{a}(\lambda_i) = \exp[-S(\lambda_i) - 440)] \cdot \mathbf{a}_{y}(440) + \mathbf{a}_{ph}^*(\lambda_i) \cdot \mathbf{a}_{ph}(440) + \mathbf{a}_{w}(\lambda)$ 

 $b_b(\lambda_i) = 0.5b_{aw}(\lambda_i) + b_{bp}(550) - (550/(\lambda_i)^n;$ 

$$a_y(440)$$
,  $a_{ph}(440)$ ,  $b_{bp}(550)$ ;  
S, n.

# Метод наименьших квадратов

Минимизация квадратичной формы:

$$F(k) = \sum_{i}^{n} [x_k(\gamma_i) - x_{u_{3M}}(\gamma_i)]^2$$



### Судовые измерения для валидации спутниковых алгоритмов

#### Аппаратура для измерения оптических характеристик













9-я Школа-семинар ИКИ Р АН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.

#### Приборы для световых измерений





Как правило, в экспедиционных исследованиях проводятся гидрологические измерения, прямые определения концентрации хлорофилла, взвешенного вещества, количественного и видового состава фитопланктона.









9-я Школа-семинар ИКИ Р АН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.

#### Черное море - июньское помутнение



Из года в год в июне по данным спутниковых сканеров наблюдается увеличение величины показателя рассеяния взвешенными частицами, охватывающее все море.

Для объяснения наблюдаемого помутнения существуют две гипотезы:

(i) весеннее увеличение поступления взвеси благодаря речному стоку и ее последующее распространение ОЧТ и мезомасштабными вихрями.

(ii) кокколитофоридное цветение, охватывающее все море.



# Что такое кокколитофориды

Кокколитофориды (coccolithophoride, также называемые coccolithophore) - одноклеточная водоросль со сферическими клетками, покрытыми дискообразными частицами (coccoliths), состоящими из карбоната кальция CaCO<sub>3</sub>. Ниже – фотографии черноморских кокколитофорид *Emiliania huxleyi*, сделанные под электронным микроскопом.



Клетки кокколитофорид, покрытые кокколитами (**plated cells**)

#### Целые и разрушенные кокколиты

#### Черное море - июньское помутнение



Из года в год в июне по данным спутниковых сканеров наблюдается увеличение величины показателя рассеяния взвешенными частицами, охватывающее все море.

Для объяснения наблюдаемого помутнения существуют две гипотезы:

(i) весеннее увеличение поступления взвеси благодаря речному стоку и ее последующее распространение ОЧТ и мезомасштабными вихрями.

(ii) кокколитофоридное цветение, охватывающее все море.



# Что такое кокколитофориды

Кокколитофориды (coccolithophoride, также называемые coccolithophore) - одноклеточная водоросль со сферическими клетками, покрытыми дискообразными частицами (coccoliths), состоящими из карбоната кальция CaCO<sub>3</sub>. Ниже – фотографии черноморских кокколитофорид *Emiliania huxleyi*, сделанные под электронным микроскопом.



Клетки кокколитофорид, покрытые кокколитами (**plated cells**)

#### Целые и разрушенные кокколиты

Сравнение сезонных изменений среднемесячных распределений показателя рассеяния назад взвешенными частицами *b*<sub>bp</sub> (слева) и концентрации хлорофилла (справа) в Черном море в период март-август 2010 г. по данным спутникового сканера MODIS-Aqua





### 26-30 апреля



### 6-10 июня



1-6 июля



htpstody 21 May 2008 10 55.00 - 25 May 2008 10 35.00

### 21-25 мая



### 16-20 июня



### 16-20 июля

Динамика изменения распределений показателя рассеяния назад взвесью в 2006 г. по данным сканера цвета MODIS-Aqua.

### 15 июля 2012 г.





#### Б

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<sub>сос</sub>.

Межгодовые изменения среднемесячных значений показателя рассеяния *b*<sub>bp</sub>, м<sup>-1</sup> в июне и температуры SST <sup>0</sup>С в феврале в восточной части открытого моря (субрегион 7) по данным сканера MODIS-Aqua





### Взвешенное вещество в юговосточной части Балтийского моря

Среднемесячные пространственные распределения с марта по сентябрь, осредненные за период 2003-2014 г.

Изображения в видимом цвете со сканера Landsat-8: А, 23 июля, Б, 18 сентября 2014



land 9-я Школа-с<mark>еминар ИКИ Р АН, Таруса, no data</mark>12<mark>-16 апреля 2018 г.</mark>



#### Черное море - июньское помутнение



Из года в год в июне по данным спутниковых сканеров наблюдается увеличение величины показателя рассеяния взвешенными частицами, охватывающее все море.

Для объяснения наблюдаемого помутнения существуют две гипотезы:

(i) весеннее увеличение поступления взвеси благодаря речному стоку и ее последующее распространение ОЧТ и мезомасштабными вихрями.

(ii) кокколитофоридное цветение, охватывающее все море.



# Что такое кокколитофориды

Кокколитофориды (coccolithophoride, также называемые coccolithophore) - одноклеточная водоросль со сферическими клетками, покрытыми дискообразными частицами (coccoliths), состоящими из карбоната кальция CaCO<sub>3</sub>. Ниже – фотографии черноморских кокколитофорид *Emiliania huxleyi*, сделанные под электронным микроскопом.



Клетки кокколитофорид, покрытые кокколитами (**plated cells**)

#### Целые и разрушенные кокколиты

Сравнение сезонных изменений среднемесячных распределений показателя рассеяния назад взвешенными частицами *b*<sub>bp</sub> (слева) и концентрации хлорофилла (справа) в Черном море в период март-август 2010 г. по данным спутникового сканера MODIS-Aqua





### 26-30 апреля



### 6-10 июня



1-6 июля



htpstody 21 May 2008 10 55.00 - 25 May 2008 10 35.00

### 21-25 мая



### 16-20 июня



### 16-20 июля

Динамика изменения распределений показателя рассеяния назад взвесью в 2006 г. по данным сканера цвета MODIS-Aqua.

### 15 июля 2012 г.





#### Б

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<sub>сос</sub>.

Межгодовые изменения среднемесячных значений показателя рассеяния *b*<sub>bp</sub>, м<sup>-1</sup> в июне и температуры SST <sup>0</sup>С в феврале в восточной части открытого моря (субрегион 7) по данным сканера MODIS-Aqua



#### Баренцево море



Три субрегиона: Северный (1), Средний (2) и Южный (3)



Показатель рассеяния назад взвешенными частицами, м<sup>-1</sup>

### Кокколитофоридное цветение в Баренцевом море



#### Спутниковые изображения кокколитофоридного цветения со сканера MODIS-Aqua биюля 2016 г.

Слева – в видимом цвете (таким увидел бы кокколитофоридное цветение наблюдатель, находящийся на спутнике); справа – распределение концентрации клеток кокколитофорид, рассчитанное посредством регионального алгоритма ИОРАН.



### Межгодовая изменчивость в Баренцевом море



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







### Каспийское море

Изменение среднемесячных значений концентрации хлорофилла в различных субрегионах Каспийского моря с января 1998 г. по декабрь 2010 г.

#### Балтийское море

#### Юго-восточная часть





#### Финский залив

*Хл*, мг/м<sup>3</sup>





#### *ТПМ*, °С



#### BCyan, мг/м<sup>3</sup>



9-я Школа-семинар ИКИ Р АН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.

Пространственное распределение биомассы цианобактерий *ВСуап*, мг/м<sup>3</sup> и *ТПМ*, °С в августе 2015 и 2016 гг.

Весеннее (верхнее) и летнее (нижний) цветения



60\*3

59130



2015 г.





Верхнее изображение – диатомовые водоросли; нижний – цианобактерии. LANDSAT-8.



2016 г.





9-я Школа-семинар ИКИ Р АН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.


## Depths of 1% and 0.1% PAR relative to the incident at the sea surface in the White and Barents Seas

Sea	Depth of 1% PAR, m		Depth of 0.1% PAR, m	
	from satellite data	from <i>in situ</i> data	from satellite data	from <i>in situ</i> data
White (st.4939)	7.0	8.8	11.2	14.5
Kara (st.4956)	25.3	32.2	40.5	51.0

The mean monthly distribution of the absorbed PAR at the layer of 2-3 m at the Barents Sea and White Seas in August 2000 (relative values of  $E_{abs}/E_{sur}$  are presented)



the real sea

the sea filled with clear water

## Влияние кокколитофоридных цветений на проникновение и распространение ФАР в поверхностном слое моря



Пространственное распределение концентрации кокколитофорид N<sub>coc</sub> (млн. кл/л) по данным MODIS 6.07.2016 г. (GMT 10:00). Показаны точки на широтном разрезе по 71° с.ш., для которых были проведены расчеты.



Изменение величины ФАР на глубине 5 м (Вт м<sup>-2</sup>, кружочки, сплошная линия), концентрации кокколитофорид N<sub>coc</sub> (млн. кл/л, ромбики, сплошная линия) и альбедо водной толщи (%, крестики, пунктирная линия) на разрезе по 71° с.ш. по данным MODIS 6.07.2016 г.

## Спасибо за внимание

9-я Школа-семинар ИКИ Р АН, Таруса, 12-16 апреля 2018 г.