



Межгодовая изменчивость биооптических характеристик Баренцева и Карского морей по данным спутниковых сканеров цвета

Глуховец Д.И., Салинг И.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В.
glukhovets@ocean.ru

Лаборатория оптики океана

История Лаборатории оптики океана Института океанологии РАН началась в **1959 году**.

С момента её становления традиционными задачами были и остаются:

- разработка гидрооптической аппаратуры,
- экспериментальные исследования гидрооптических характеристик,
- изучение географического распределения оптических свойств вод океанов и морей.



Современные задачи Лаборатории оптики океана

- Вместе с сохранением богатого наследия приоритетным направлением исследований Лаборатории стали спутниковые методы исследования биопродуктивности по данным о цвете океана:
 - Анализ и обработка данных спутниковых сканеров цвета
 - Их валидация по данным подспутниковых измерений
 - Разработка и модификация региональных биооптических алгоритмов
 - Проведение подспутниковых измерений
- Значительно изменилось направление экспедиционной деятельности: основное внимание стало уделяться исследованию морей России, в том числе арктических, и их прибрежной зоны.

Биооптические характеристики вод

«Под “биооптическими характеристиками” понимается совокупность биологических и оптических параметров, основной набор которых включает концентрацию **хлорофилла (Хл)** , показатель рассеяния назад взвешенными частицами и показатель поглощения **окрашенным растворенным органическим веществом (ОРОВ)**»

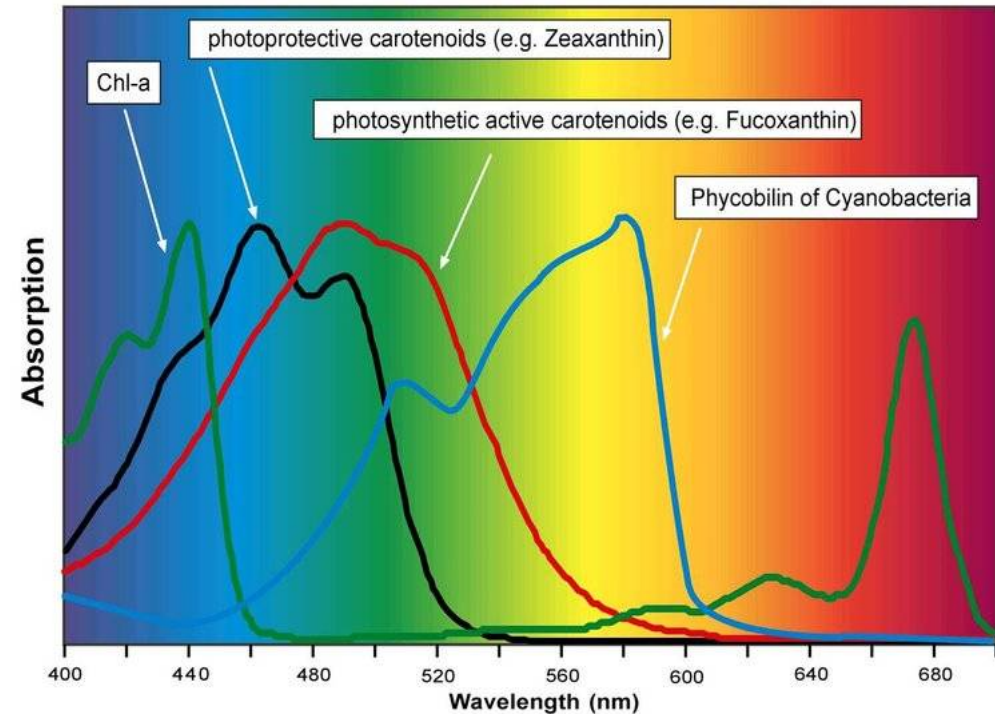
О.В. Копелевич и др., 2018

Измеряются в рейсах:

1. Интенсивности флуоресценции хлорофилла и ОРОВ
2. Показатели поглощения и ослабления морской воды
3. Концентрации хлорофилла и взвеси

Пигменты фитопланктона

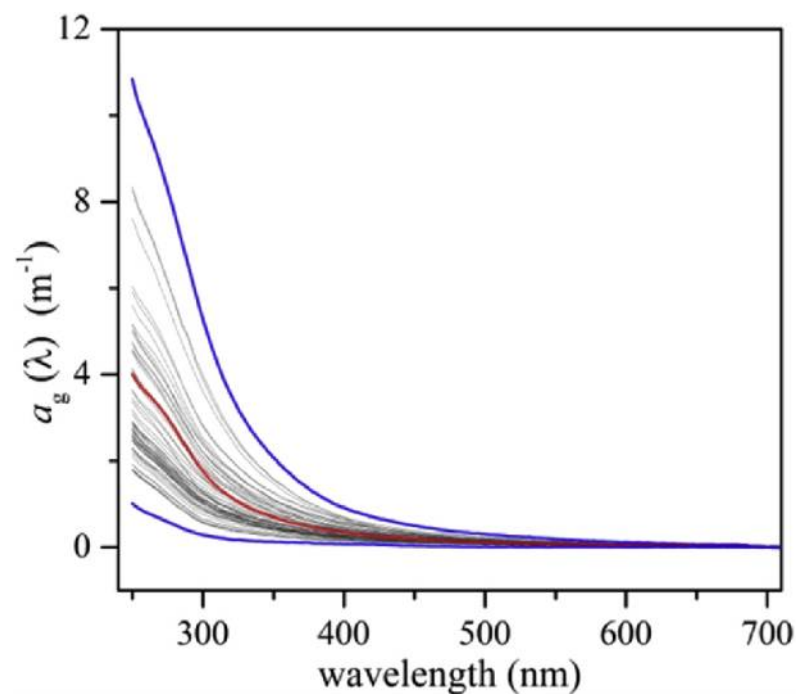
Концентрация хлорофилла – важнейший параметр, характеризующий биомассу фитопланктона и использующийся для расчета первичной продукции океанов и морей, единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных и временных масштабов.



Окрашенное растворенное органическое вещество

РОВ - преобладающая форма существования органического вещества в морских и пресных водах. В основной своей массе РОВ представлено водным гумусом, состоящим из трудноразлагаемых гуминовых кислот.

ОРОВ (или **желтое вещество**) – поглощает свет в видимой и ультрафиолетовой областях спектра.



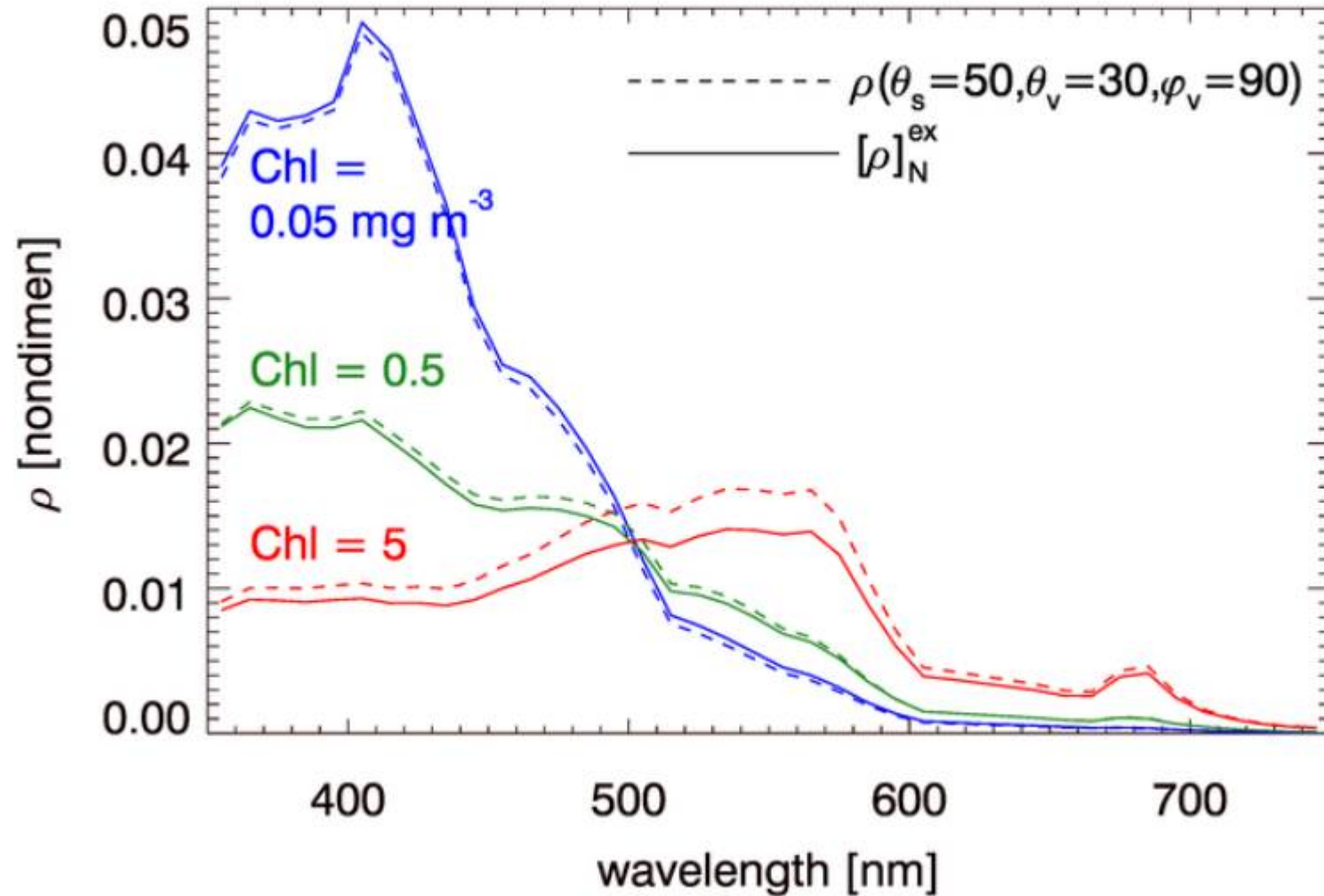
Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



Биооптические параметры

Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости моря R_{rs}	Характеризует пространственно-временную изменчивость свойств поверхностного слоя; входной параметр для всех остальных биооптических алгоритмов
Концентрация хлорофилла X_l	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевая характеристика для расчета первичной биопродукции
Показатель поглощения ОРОВ или желтого вещества a_g	Определяет поглощение света в воде; характеризует содержание окрашенной органики и качество воды в прибрежной зоне
Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}	Определяет альбедо водной толщи; позволяет определить содержание взвеси
Концентрация взвеси TSM	Характеризует содержание взвеси в воде
Концентрация кокколитофорид N_{coc}	Характеризует цветение кокколитофорид

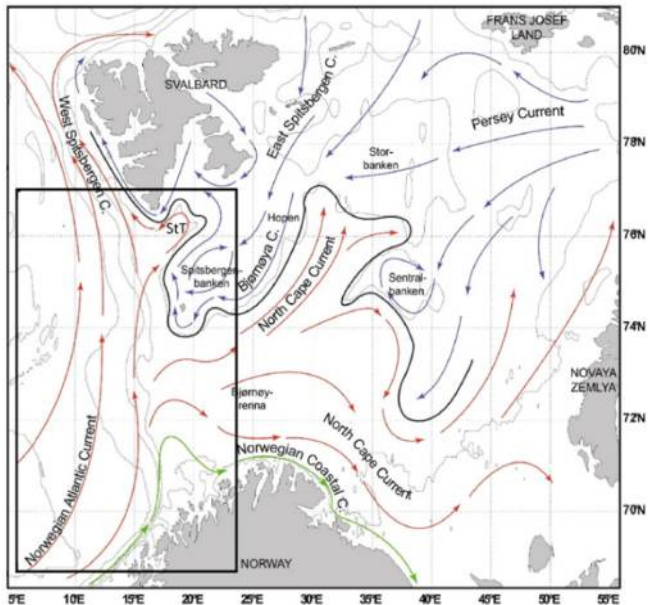
Определение концентрации хлорофилла по данным спутниковых сканеров цвета



Определяющие факторы (воды 2 типа)

- Баренцево: арктические и атлантические воды, цветения кокколитофорид
- Карское: речной сток
- Лед

Поверхностная циркуляция
в Баренцевом море
(Giraudeau et al., 2016)



Кокколитофоридное цветение
в Баренцевом море

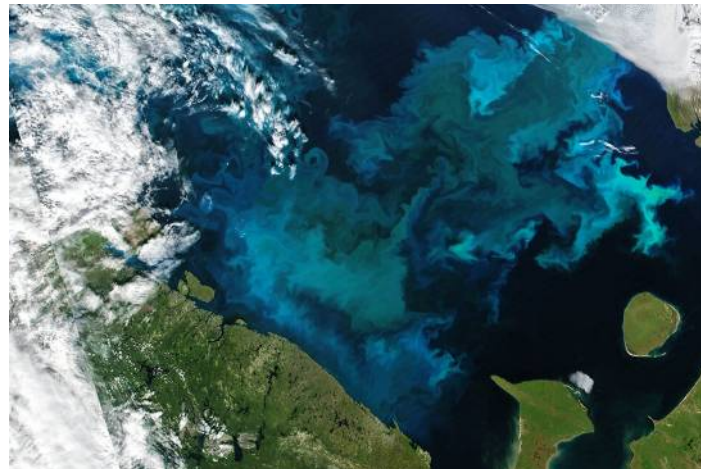
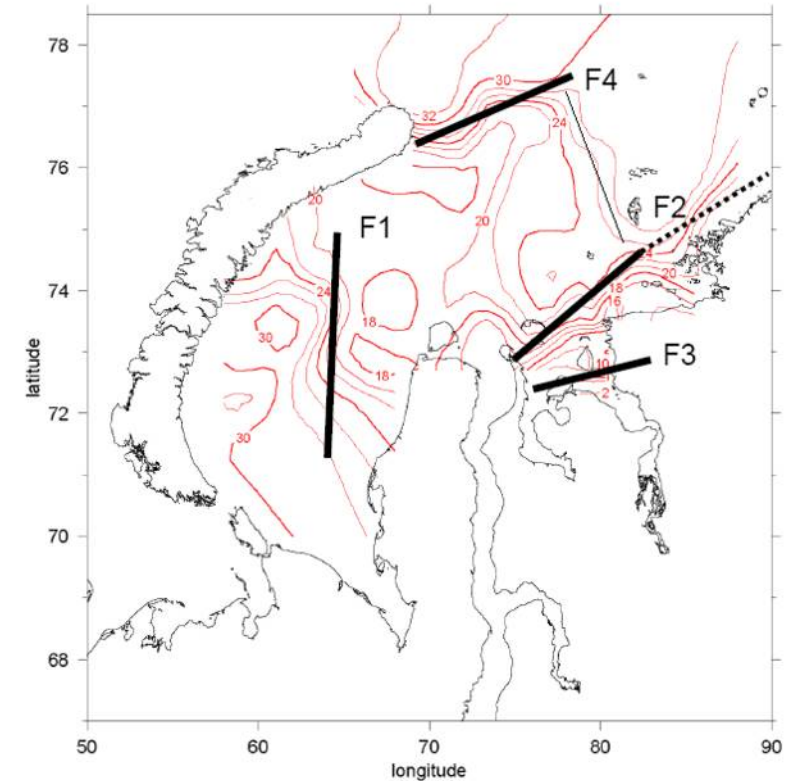
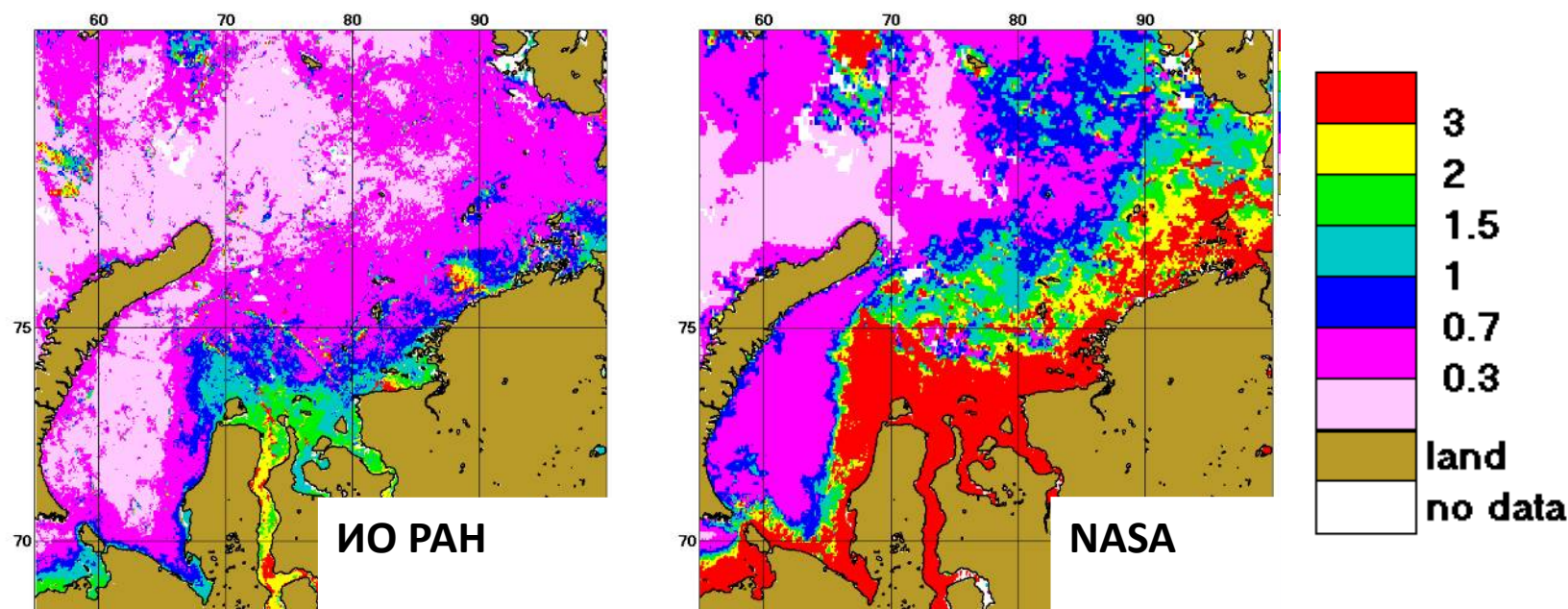


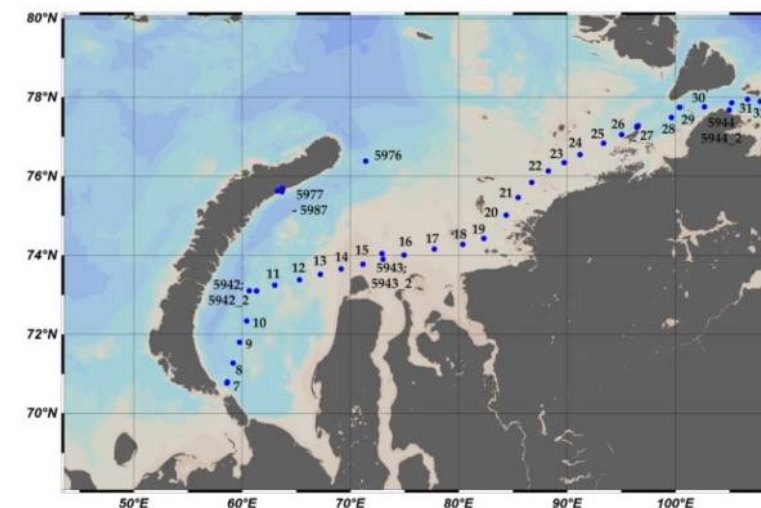
Схема фронтальных
зон Карского моря
(Завьялов и др., 2015)
Мезомасштабная
пятнистость
(Пелевин и др., 2017)



Необходимость разработки региональных алгоритмов

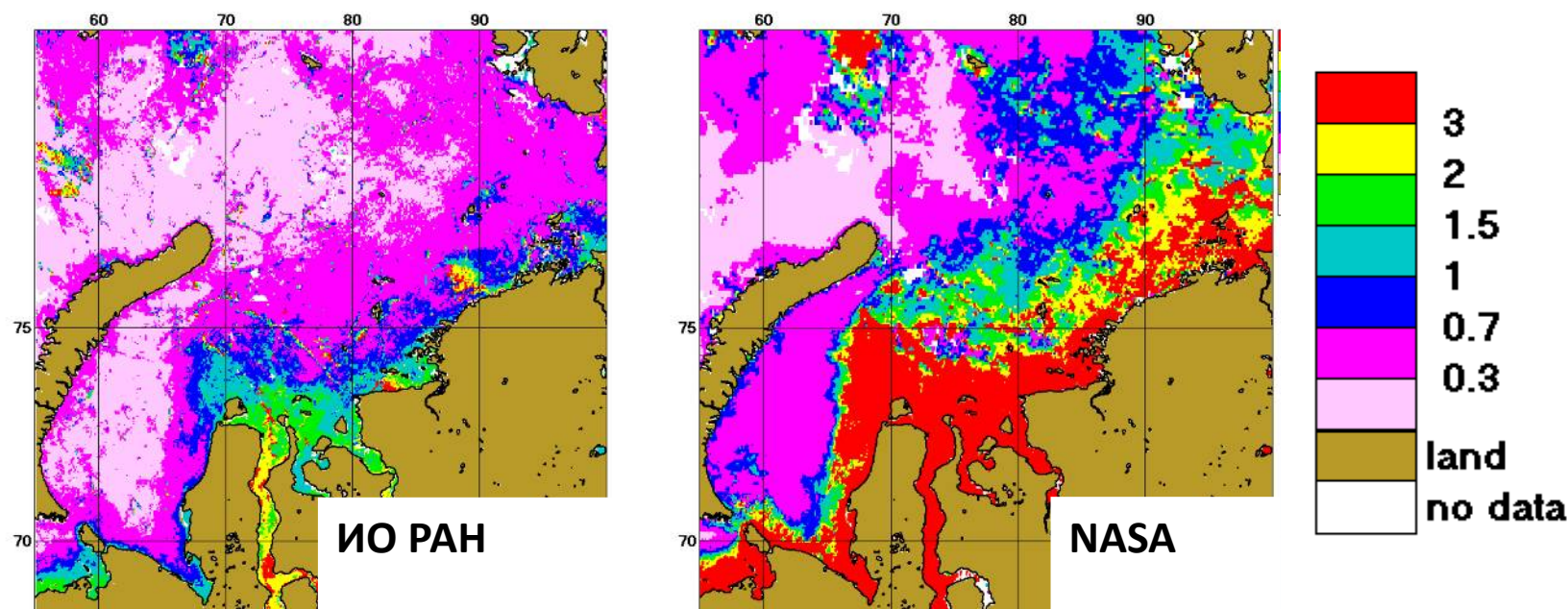


Среднемесячные распределения концентрации хлорофилла *a* (mg m^{-3}) в Карском море в августе 2018 г. по данным спутникового сканера цвета MODIS. Средняя относительная ошибка алгоритма ИО РАН - **69 %**, NASA – **850 %**. Валидация проведена по данным прямых измерений, выполненных в 72-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».

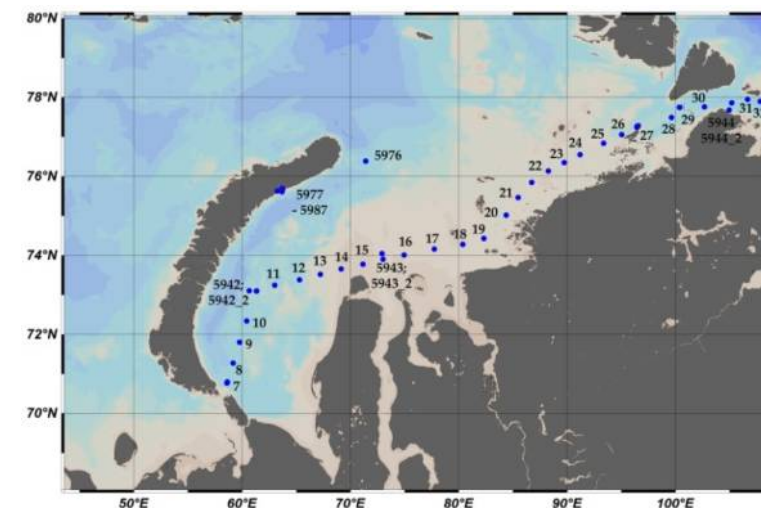


72-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», август-сентябрь 2018 г.

Необходимость разработки региональных алгоритмов



Среднемесячные распределения концентрации хлорофилла *a* (мг м^{-3}) в Карском море в августе 2018 г. по данным спутникового сканера цвета MODIS. Средняя относительная ошибка алгоритма ИО РАН - **69 %**, NASA – **850 %**. Валидация проведена по данным прямых измерений, выполненных в 72-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш».



72-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», август-сентябрь 2018 г.

Для разработки и валидации более точных региональных алгоритмов требуется проведение судовых измерений

Региональные алгоритмы, разработанные в ЛОО ИО РАН

	Хлорофилл	Взвесь	Поглощение ОРОВ	Концентрация кокколитофорид
Баренцево	+	+	+	+
Карское	+	+	+	Х
Белое	+	+	+	Х
Балтийское	+	+		Х
Черное	+	+	+	+
Каспийское	+	+	+	Х
Лаптевых	+			Х

<https://optics.ocean.ru>

**Биооптические характеристики
морей, омывающих берега западной
половины России, по данным
спутниковых сканеров цвета
1998-2017 гг.**

О.В. Копелевич, И.В. Салинг, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец,
С.В. Шеберстов, В.И. Буренков, П.Г. Каралли, А.В. Юшманова



Экспедиционные исследования



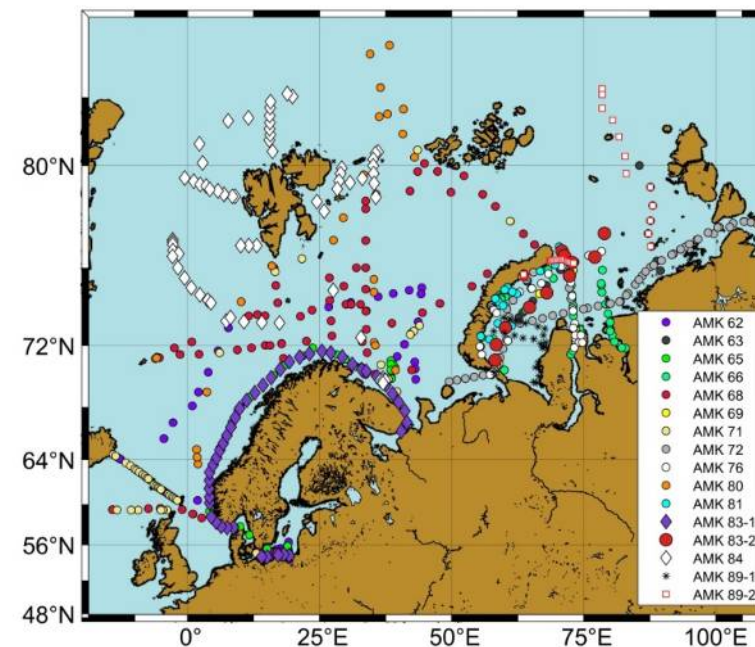
Работа на станциях

- Зондирования
- Измерения коэффициента яркости моря
- Отбор проб

Непрерывные измерения на ходу судна

- Проточный комплекс
- Световые поля

Карта станций 2015-2022 гг.

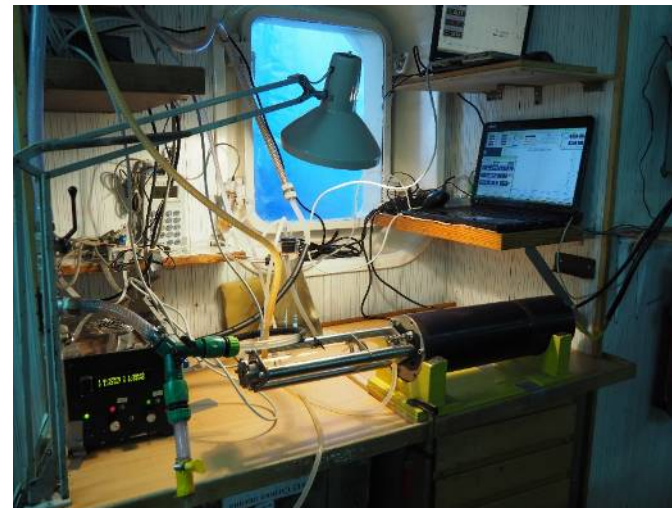
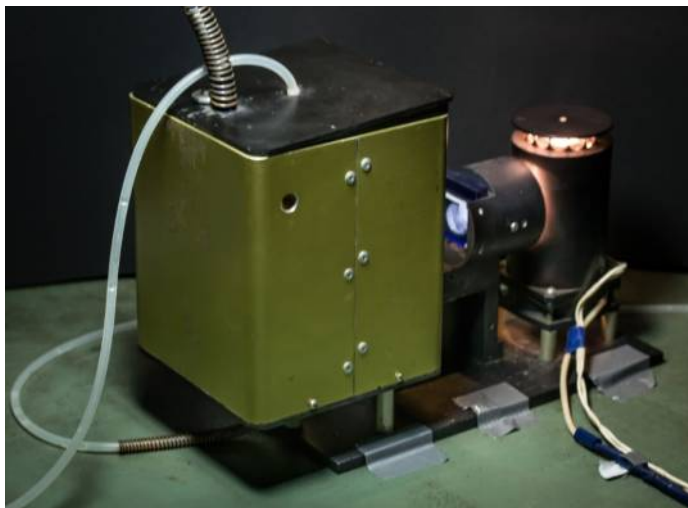




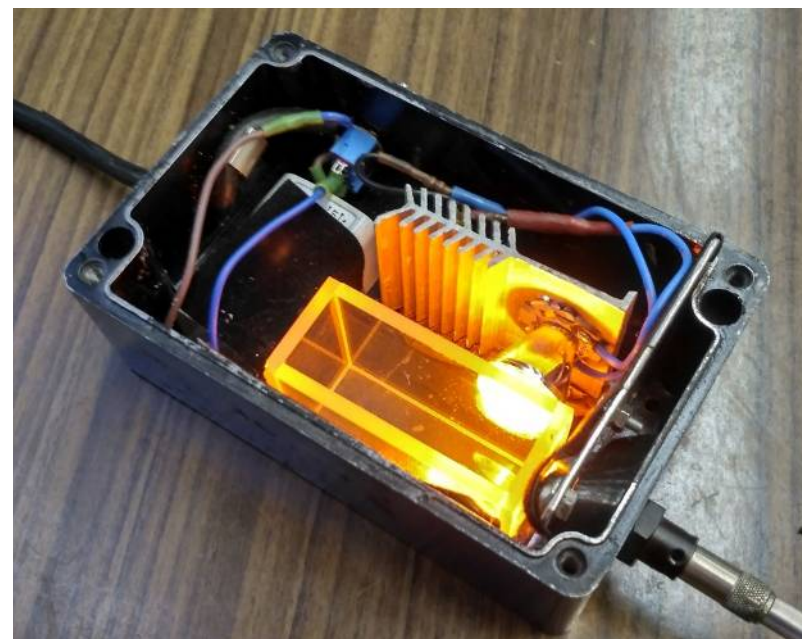
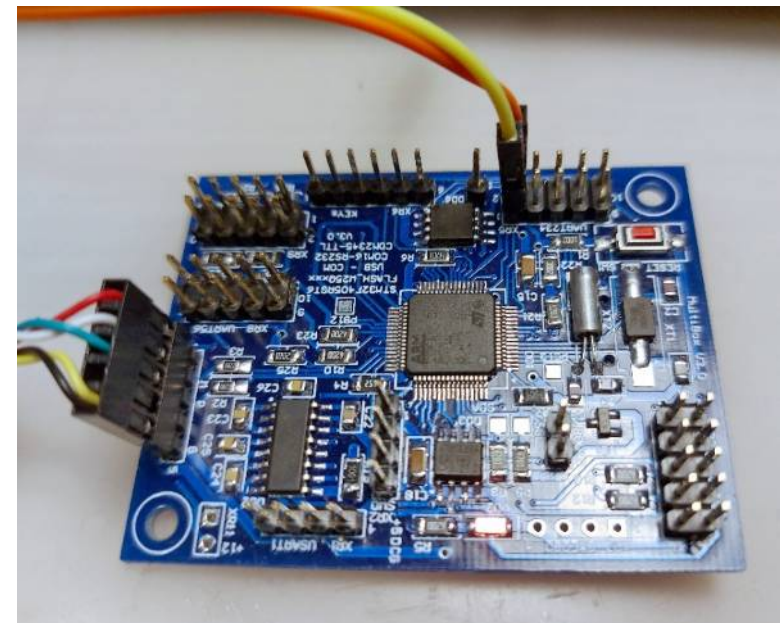




Аппаратура для проведения судовых измерений



Разработка и создание гидрооптических приборов

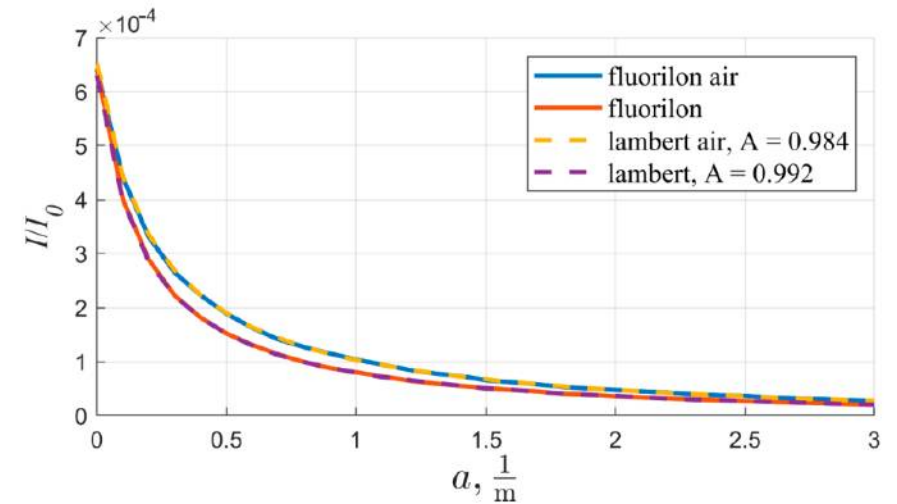
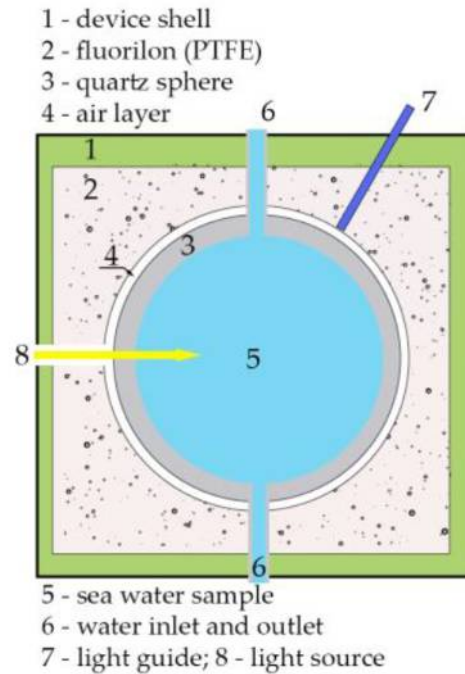


Численное моделирование формирования структуры светового поля в интегрирующей сфере методом Монте-Карло

Разработана программа, в которой методом Монте-Карло моделируется формирование светового излучения внутри сферы.



Портативный спектрофотометр с интегрирующей сферой



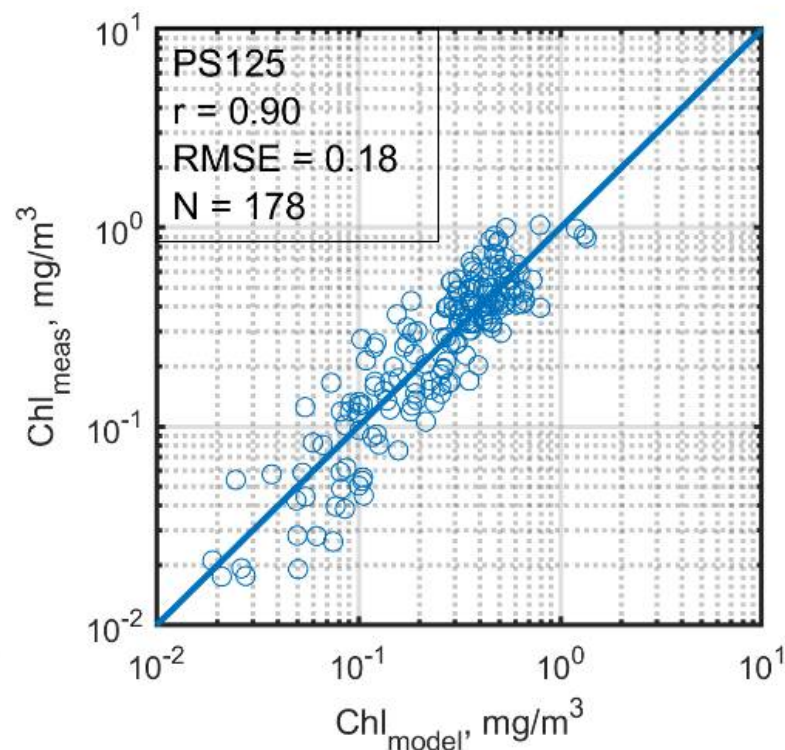
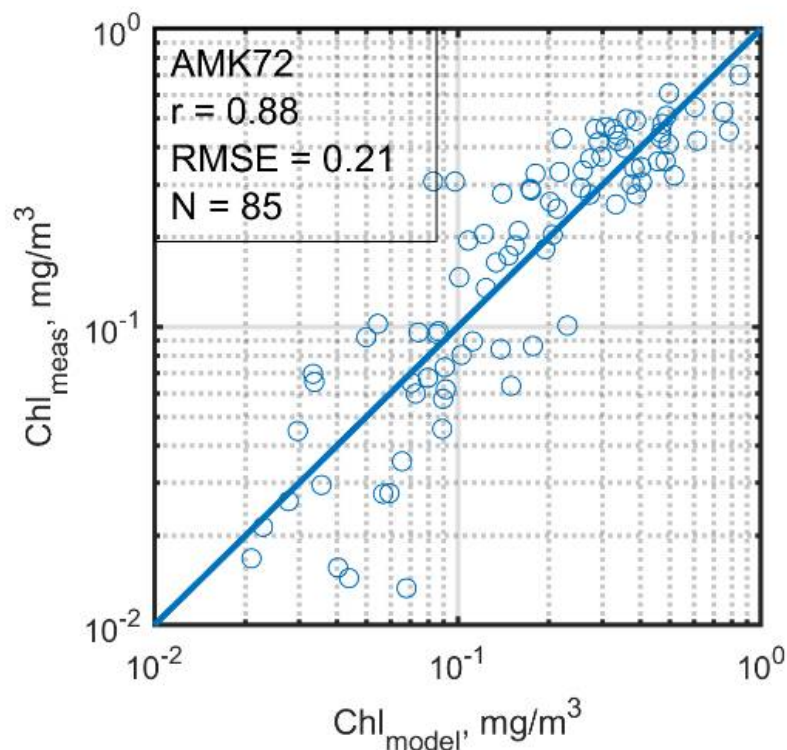
Влияние воздушной прослойки между флуорилоном и кварцем

$$a(\lambda) = \frac{1}{u} \left\{ \left(\frac{k}{k_s} \frac{I_s(\lambda)}{I(\lambda)} \right)^{1/\nu} - 1 \right\}$$

Спектральный флуоресцентный метод оперативной оценки концентрации хлорофилла а

Для проведения измерений используется относительно простой двухканальный лазерный спектрометр. Предварительная подготовка проб не требуется. Точность оценки сопоставима с экстракционными методами определения концентрации хлорофилла: ошибки 40-50% при использовании общей формулы и 20-35% при послерейсовой калибровке.

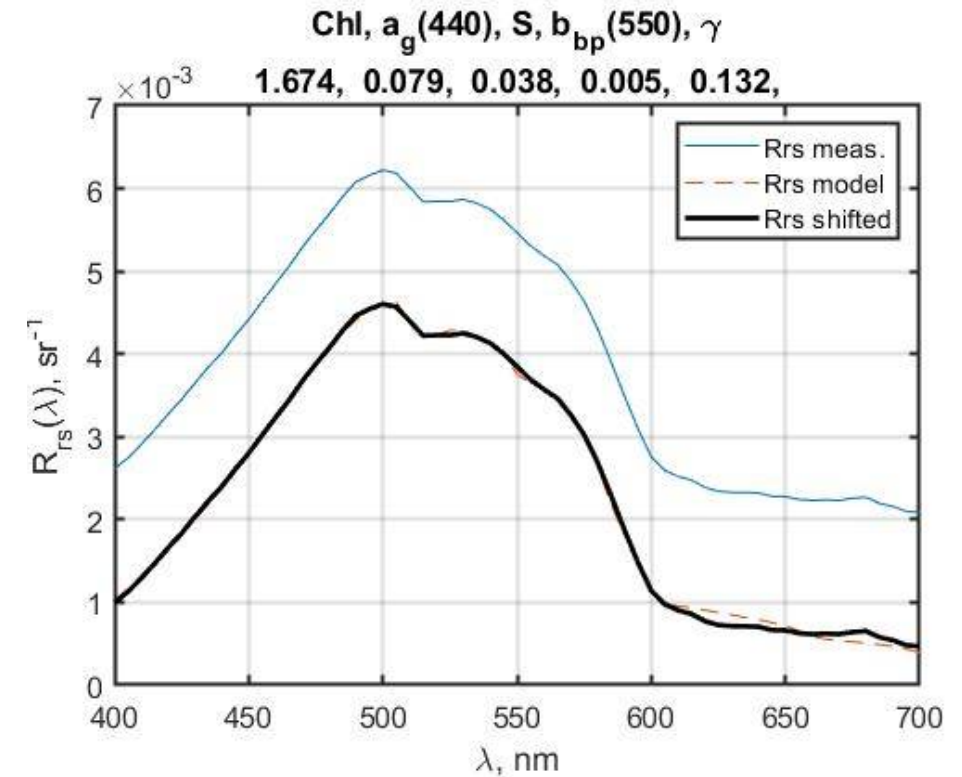
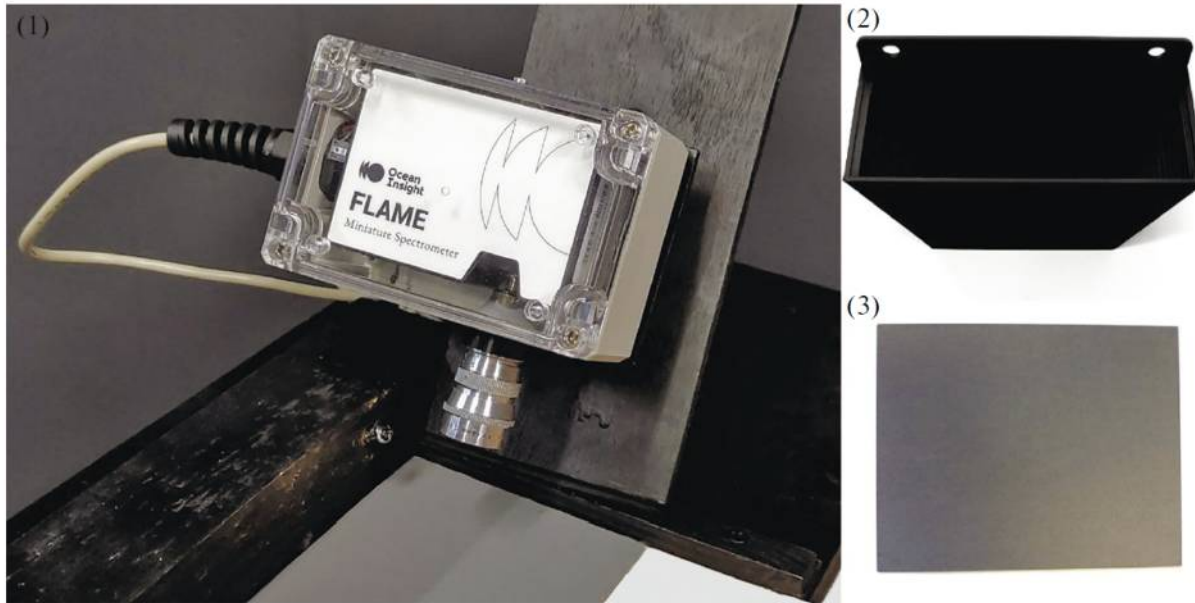
$$\text{Chl} = 0.65 I_{fl}(405)^{0.23} I_{fl}(532)^{0.59}$$



Общий вид двухканального лазерного спектрометра

Многомерные регрессии между восстановленными значениями концентрации хлорофилла и результатами их прямых измерений в 72-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (слева) и 125-м рейсе НИС «Профессор Штокман» (справа)

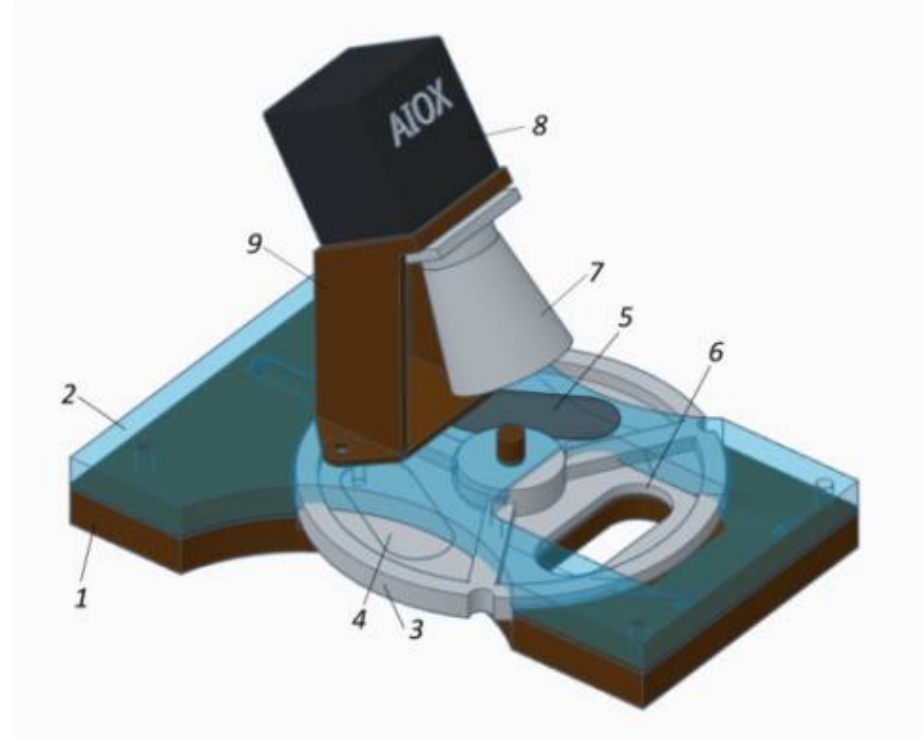
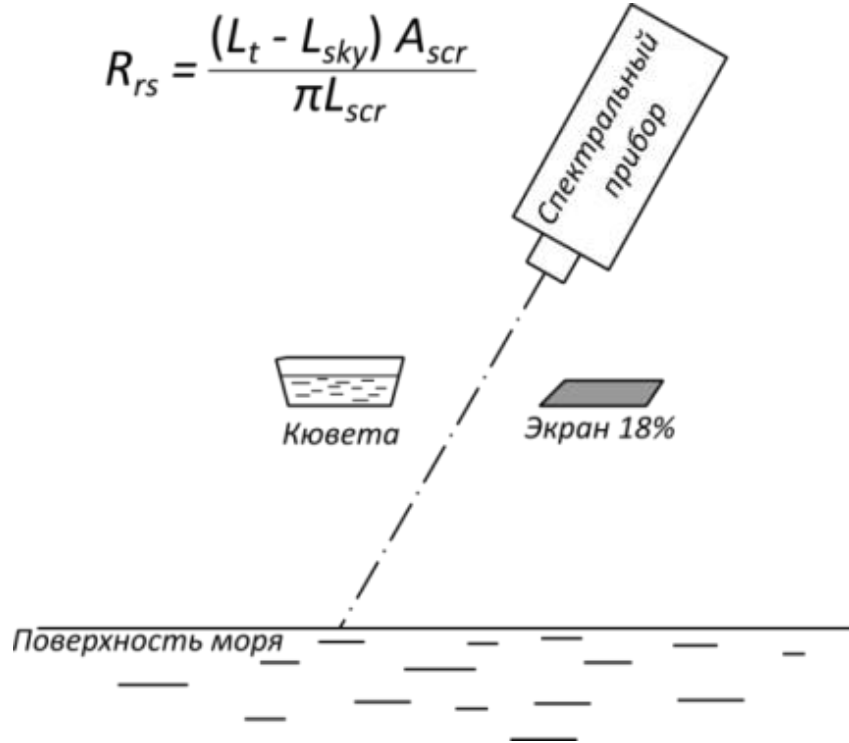
Палубный спектрорадиометр



Внешний вид макета палубного спектрорадиометра (слева) и пример полученного с его использованием спектра коэффициента яркости моря (справа), Карское море, 89-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», сентябрь 2022 г.

- + возможность работы на ходу судна
- + быстродействие (0,1-0,5 с на спектр)
- + высокое спектральное разрешение (<1 нм)
- + компактные габариты
- + оперативная оценка значений биооптических характеристик

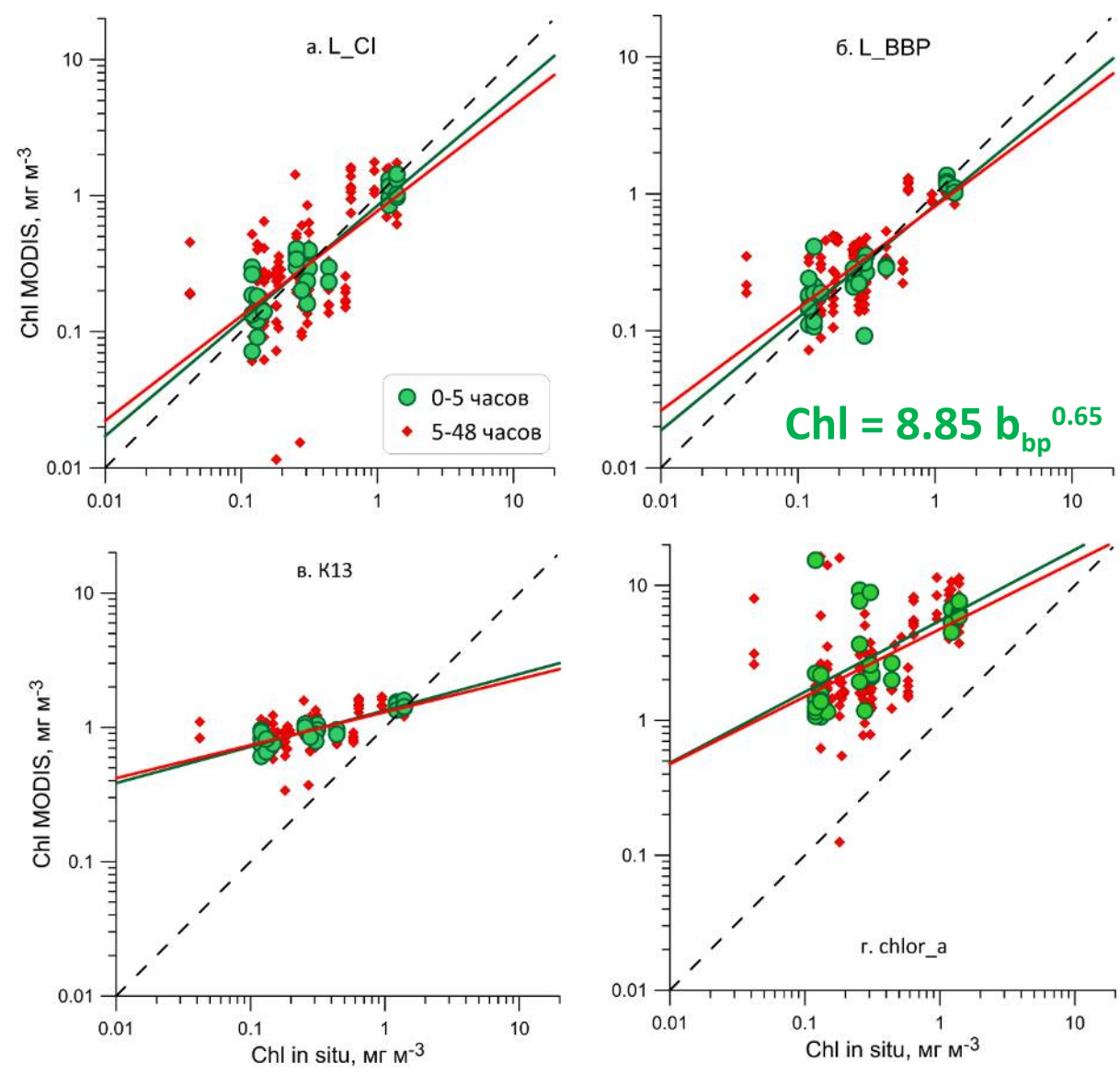
Малогабаритный спектрорадиометр



Слева – метод измерения спектрального коэффициента яркости;
в центре – схема спектрорадиометра: 1 – основание, 2 – крышка, 3 – диск, 4 – серый экран, 5 – черное стекло HC-11, 6 – окно, 7 – объектив, 8 – спектрометр, 9 – стойка;
справа – общий вид прибора

Региональный алгоритм оценки концентрации хлорофилла для моря Лаптевых

На основе данных натурных измерений в 2015, 2017 и 2018 гг.

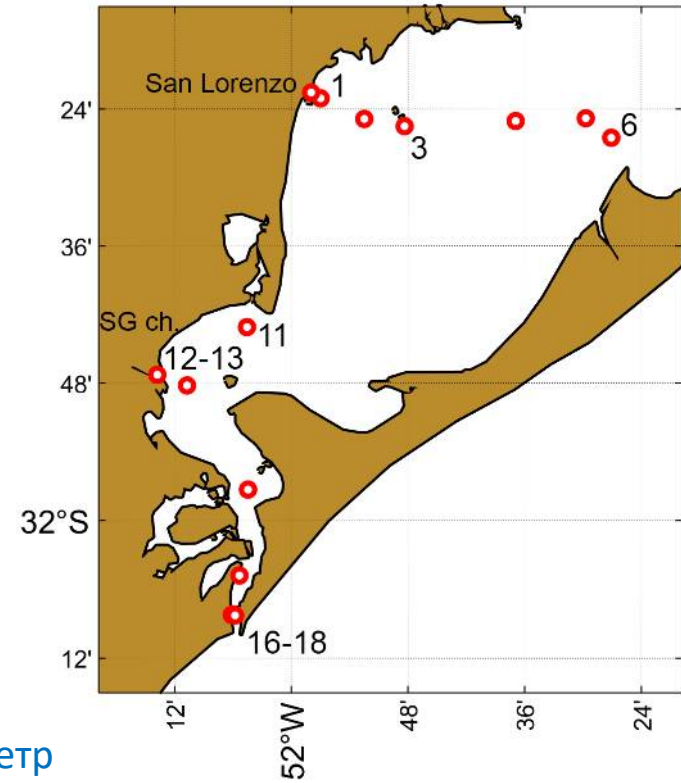


Алгоритмы:
L_CI – для Лаптевых через индекс цвета
L_BBP – для Лаптевых через b_{bp}
K13 – для Карского
chlor_a – стандартный

Массив данных	Алгоритм	R ²	RMSE, мг м ⁻³	RE, %
ΔT < 48 часов	L_CI	0.50	0.27	60
	L_BBP	0.66	0.20	49
	K13	0.50	0.62	280
	chlor_a	0.30	4.29	1180

Экспедиция в лагуну Патос (Бразилия), 25-26 июня 2024

Средний сток в июне $2200 \text{ м}^3/\text{с}$, в период наводнения был превышен в 5-10 раз



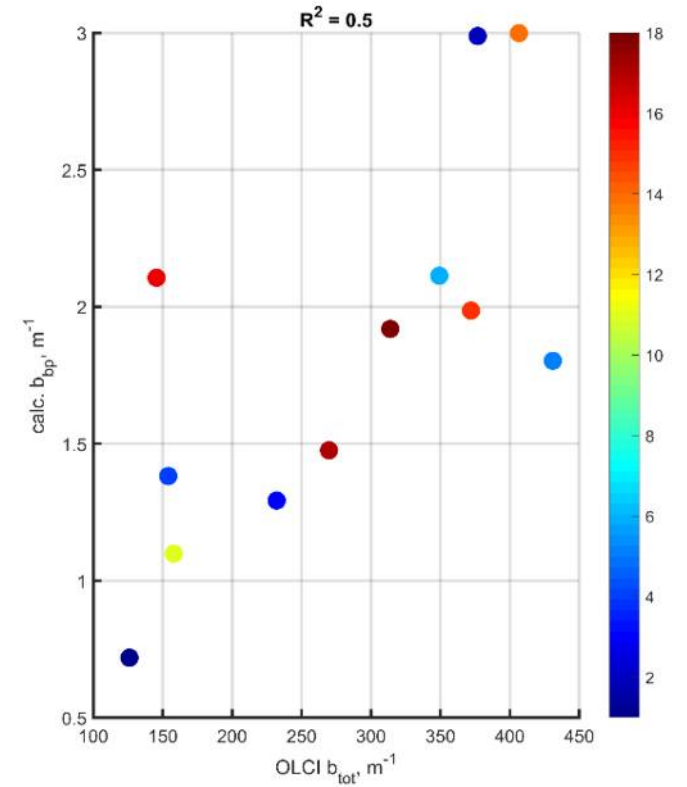
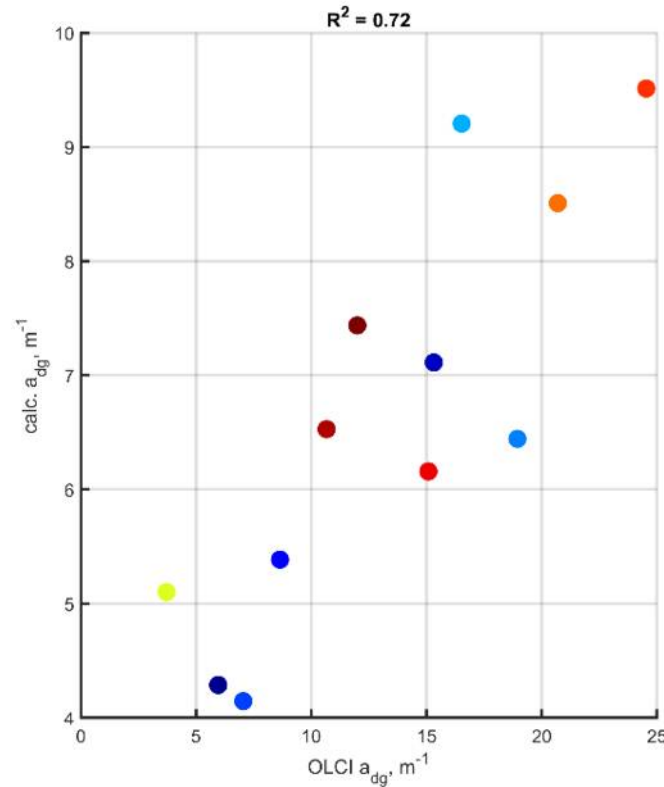
Палубный
спектрорадиометр



Первое приближение для региональных алгоритмов



OLCI/Sentinel-3B, 25 июня 2024 г.



Диаграммы рассеяния между данными судовых измерений и данными OLCI, обработанными с помощью алгоритма искусственной нейронной сети C2RCC: поглощение ОРОВ и детритом (слева) и рассеяние частиц (справа)

$$a_{dg}(440) = 0.24 * a_{dg}^{OLCI} + 3.5 \quad (N = 12, R^2 = 0.72, RMSE = 1 \text{ m}^{-1});$$

$$b_{bp}(550) = 0.0044 * b_{tot}^{OLCI} + 0.61 \quad (N = 12, R^2 = 0.5, RMSE = 0.51 \text{ m}^{-1}).$$

Полуаналитические алгоритмы ИО РАН

$$\rho_w(\lambda) = \pi (0.070 + 0.155 X^{0.752}) X$$

где $X = b_b / (a + b_b)$.

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_g(\lambda),$$

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

$$a_p(\lambda) = C_a f_{ph}(\lambda),$$

$$a_g(\lambda) = a_g \exp(-S(\lambda - 440)),$$

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda/550)^{-n}.$$

В Арктике возникают большие ошибки атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета, особенно в коротковолновых каналах. Поэтому алгоритмы ИО РАН для арктических морей не используют каналы 412, 443 и 490 нм.

А. В. Юшманова, С. В. Вазюля Валидация спутниковых алгоритмов расчёта показателя поглощения...

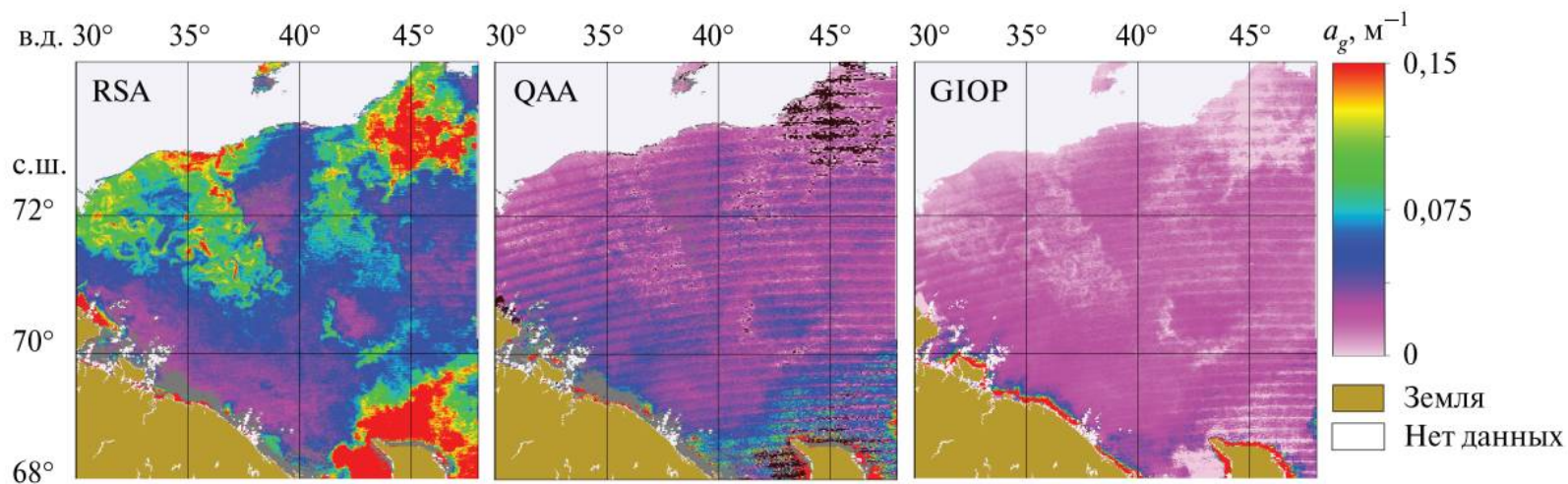
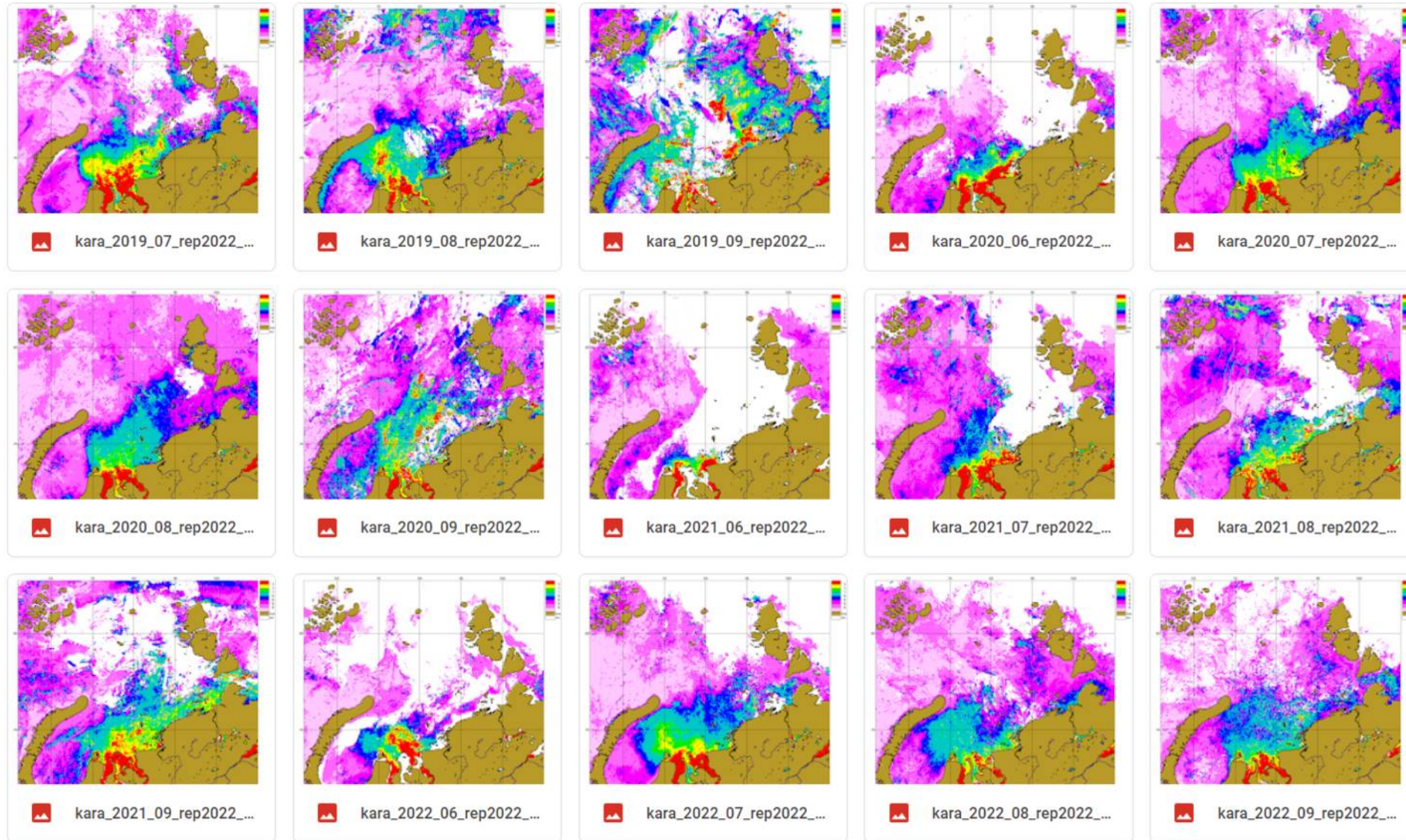


Рис. 5. Карты пространственного распределения показателя поглощения ОРОВ для алгоритмов RSA, QAA и GIOP во время 1-го этапа экспедиции АМК 83, 12 июня 2021 г.

Атлас биооптических характеристик ИО РАН



Распространение речного стока в Карском море, <https://optics.ocean.ru>

Приложения: динамика поверхностного опреснённого слоя и поглощение солнечной радиации в толще морской воды

D.I. Glukhovets, Y.A. Goldin/Oceanologia 62 (2020) 364–373

369

Remote Sens. 2022, 14, 4995

4 of 21

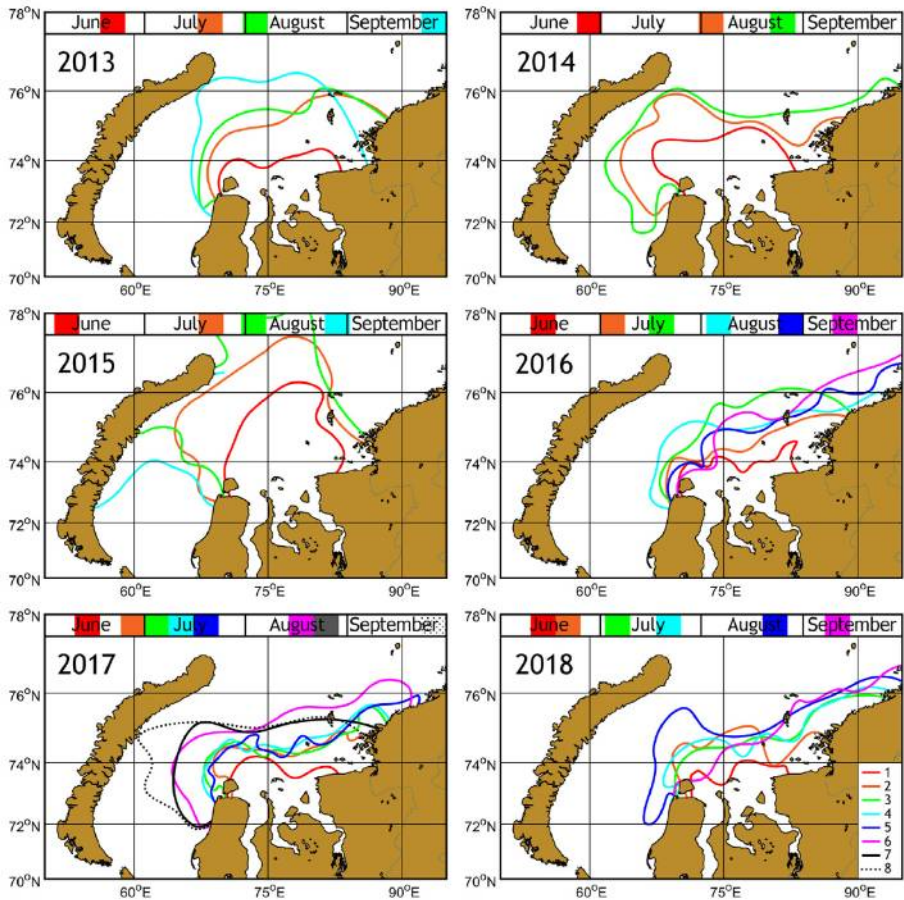


Figure 3 The boundaries positions of the surface desalinated layer at different instants of time, determined by isolines $\sigma_t(443) = 0.3 \text{ m}^{-1}$. Coloured markers in the upper part of the maps indicate the averaging time interval over which the corresponding contours are plotted.

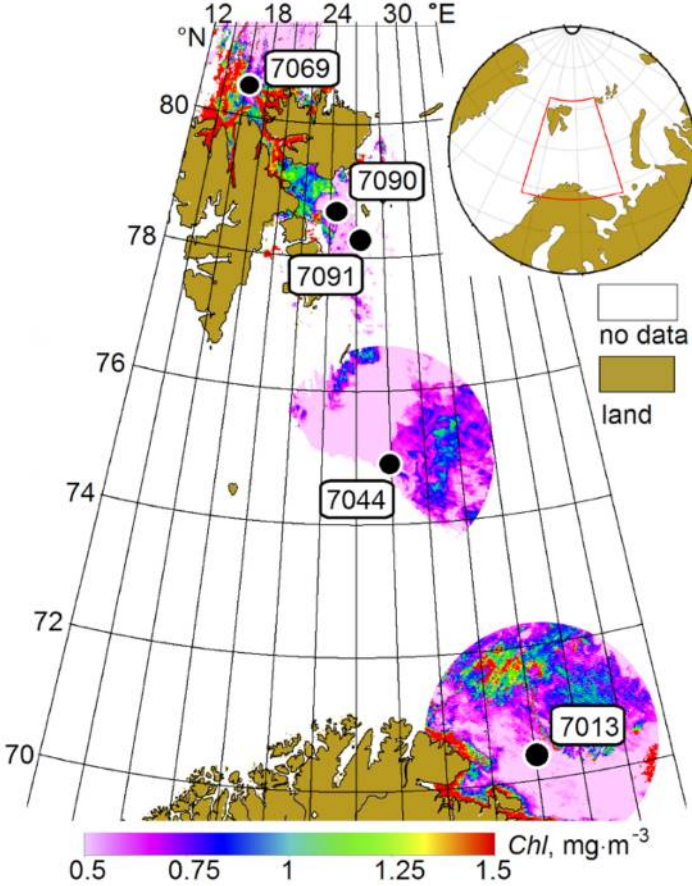
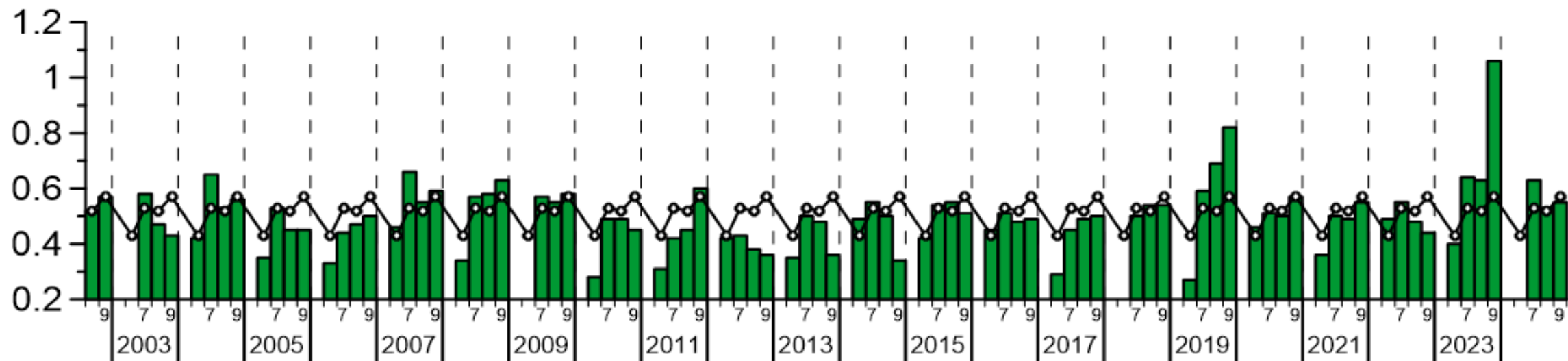


Figure 1. Position of the stations of cruises 83 and 84 of the R/V ‘Akademik Mstislav Keldysh’ against the background of the averaged spatial distribution of chlorophyll-a concentration according to MODIS/Aqua and Terra (chlora) data: 7013—12 June 2021; 7044—26 July 2021; 7069—9 August 2021; 7090 and 7091—17 August 2021.

Развитие Атласа биооптических характеристик

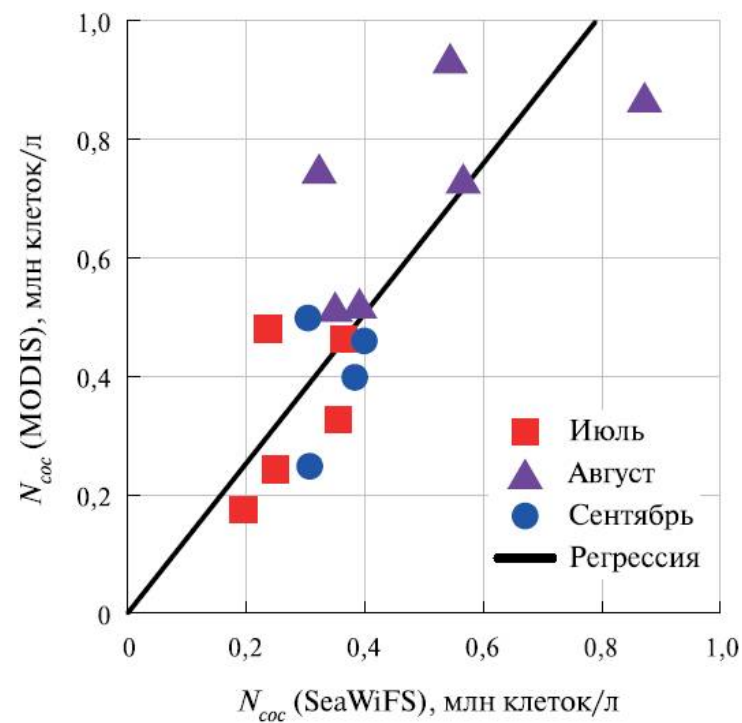


Изменения среднемесячных величин концентрации хлорофилла *a* в юго-западном регионе Карского моря (мг/м³).
Черная кривая – средние изменения за период 2003–2023 гг.

Промежуточные выводы

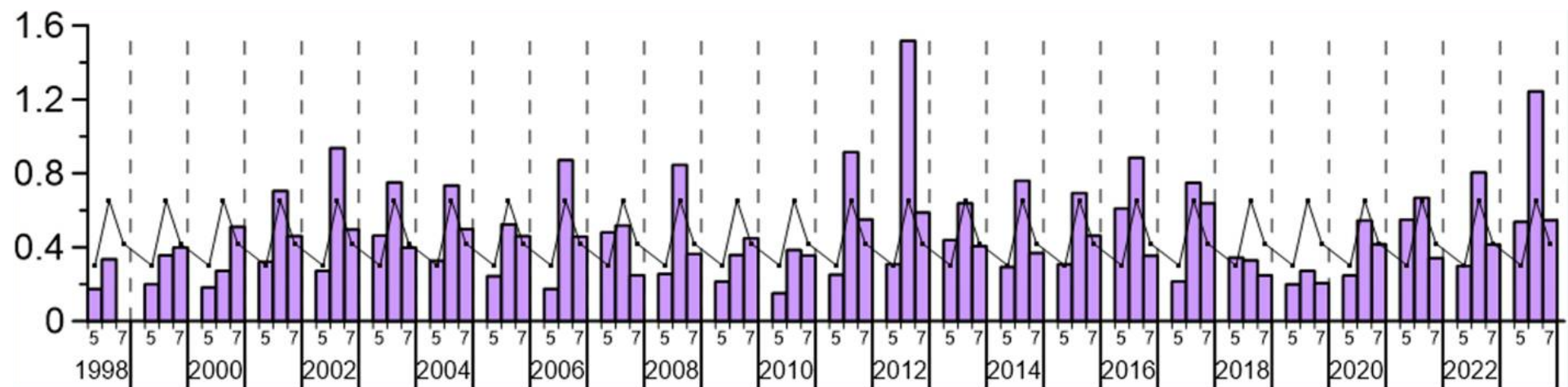
- Региональные спутниковые алгоритмы необходимы для корректной оценки значений биооптических характеристик в водах второго оптического типа, в первую очередь, подверженных влиянию речного стока.
- Для разработки и валидации региональных алгоритмов необходимо проведение судовых экспедиционных исследований. Сотрудники Лаборатории оптики океана ИО РАН проводят судовые исследования в различных акваториях Мирового океана, используя для этого современную аппаратуру, в том числе, собственной разработки.
- Полученные в последние годы новые данные судовых биооптических измерений позволяют проводить модификацию созданных ранее региональных алгоритмов.
- В Лаборатории оптики океана ИО РАН с 2002 г. выпускаются электронные атласы биооптических характеристик морей России, построенные по данным спутниковых сканеров цвета с использованием региональных алгоритмов (<http://optics.ocean.ru>). На данный момент Атлас расширен до 2024 г. и включает в себя 7 морей: Баренцево, Карское, Белое, Балтийское, Черное, Каспийское и Лаптевых.

Объединение данных сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua: ряд за четверть века



Зависимость между среднемесячными величинами концентрации кокколитофорид (N_{coc} , млн кл./л), рассчитанных по данным сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua в регионе кокколитофоридного цветения в Баренцевом море, июль-сентябрь 2002-2007 гг.

Изменения среднемесячных величин концентрации кокколитофорид (N_{coc} , млн кл./л) в Баренцевом море. Черная кривая – средние изменения за период 1998–2022 гг.

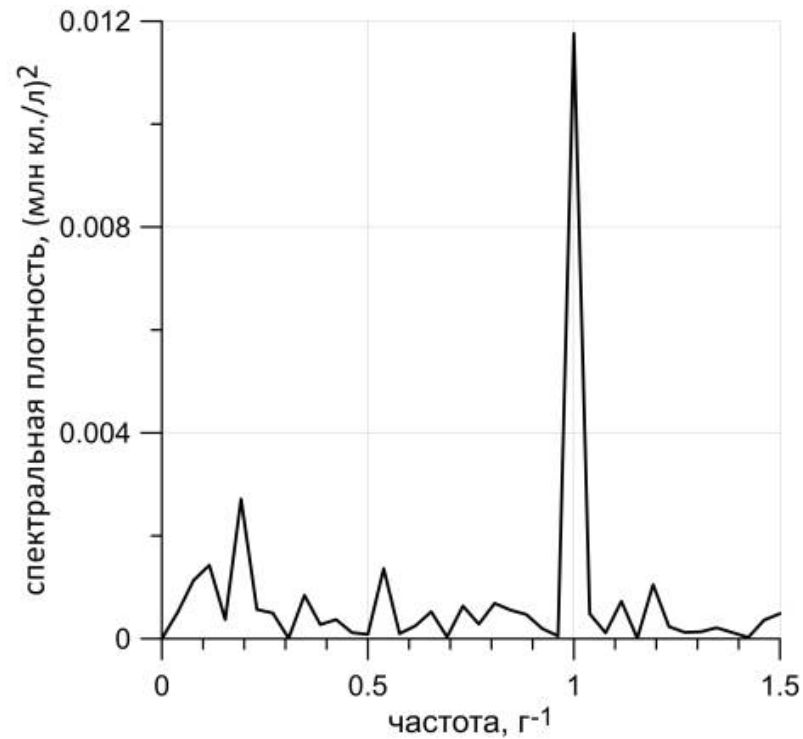
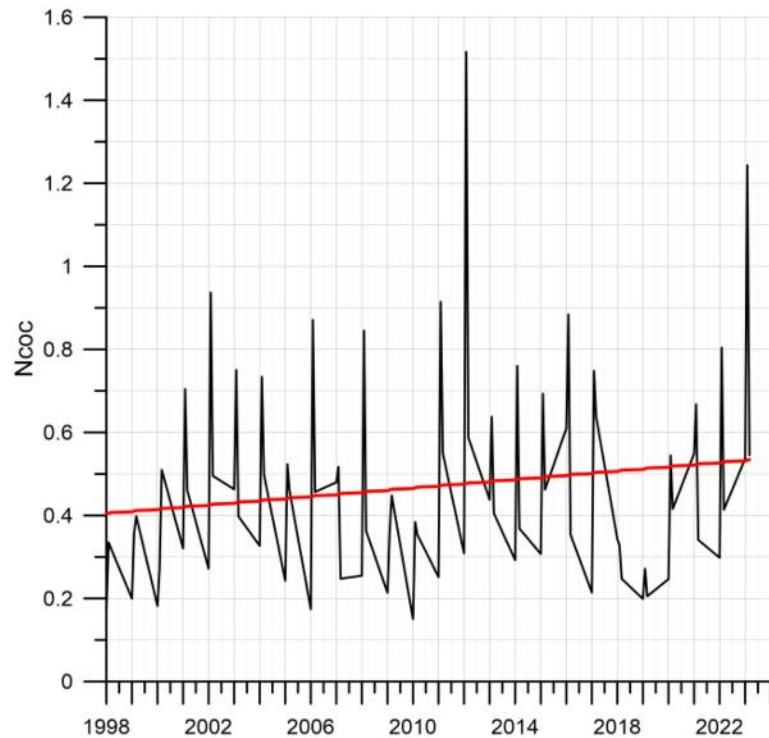


Тренды среднемесячных значений биооптических характеристик

Построены периодограммы $D(\nu) = \frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp(-i2\pi\nu t_k) \right|^2$,

где t_k – равномерная временная сетка с интервалом один месяц, а также вычислены параметры линейных трендов $x(t)=at+b$.

Коэффициент a характеризует годовое изменение соответствующей величины.



Временной ряд концентрации кокколитофорид в области цветения в Баренцевом море, красной линией показан тренд (слева), соответствующая периодограмма (справа), 1998 – 2023 гг.

Singular Spectrum Analysis

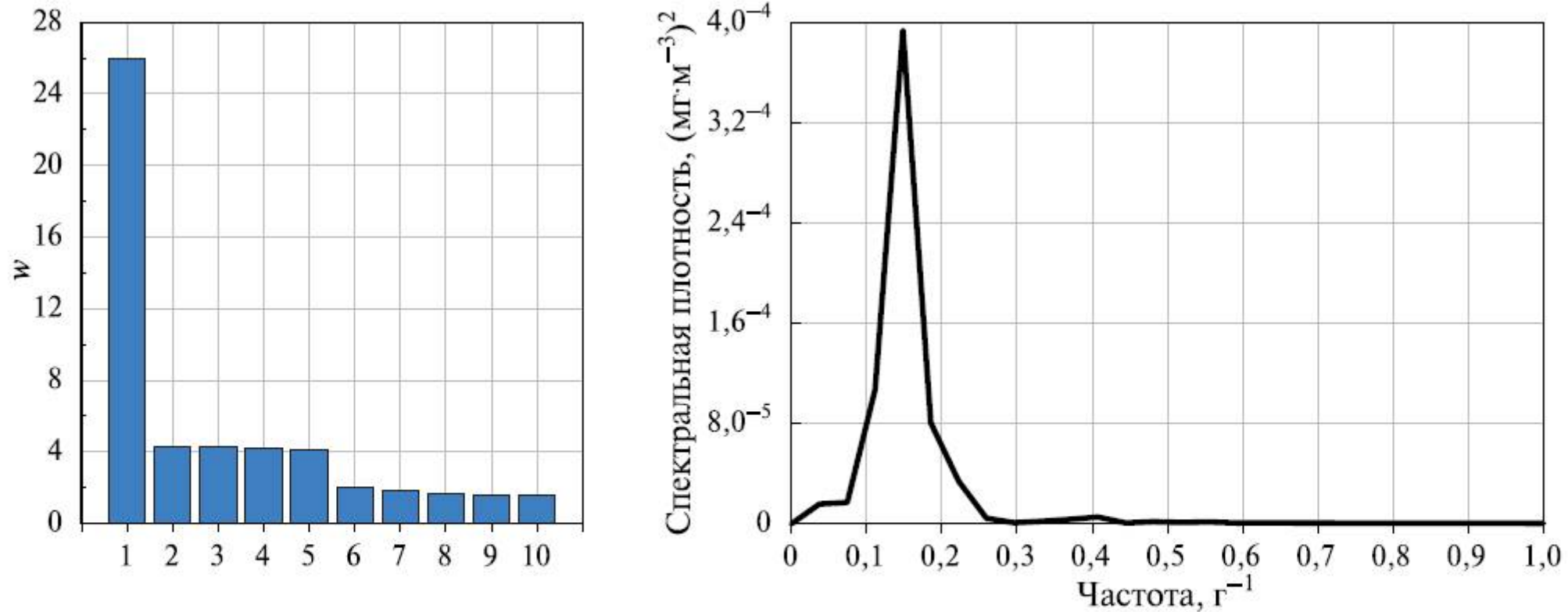


Рис. 2. Сингулярные числа, возникающие при разложении временного ряда концентрации Хл в среднем субрегионе Баренцева моря (слева), и периодограмма, соответствующая первому сингулярному числу (справа)

Сглаживание рядов

Д. И. Глуховец и др. Межгодовая изменчивость биооптических характеристик Баренцева и Карского морей

Ряд, восстановленный методом SSA, с большой точностью совпадает с результатом сглаживания методом скользящего среднего с весами, распределёнными по закону Гаусса:

$$x_i = \frac{\sum_{k=0}^N x_k \exp\left(\left(\frac{t_k - t_i}{s}\right)^2\right)}{\sum_{k=0}^N \exp\left(\left(\frac{t_k - t_i}{s}\right)^2\right)}.$$

Здесь параметр s , определяющий степень сглаживания, связан с параметром L метода SSA формулой $s = kL/n_m$, где n_m — количество рассматриваемых месяцев для каждого из морей. Для всех рассмотренных нами случаев величина k оказалась близкой к 0,6 года. *Рисунок 3* демонстрирует хорошее совпадение двух методов расчёта (SSA и скользящего среднего).

Временные ряды концентрации Хл

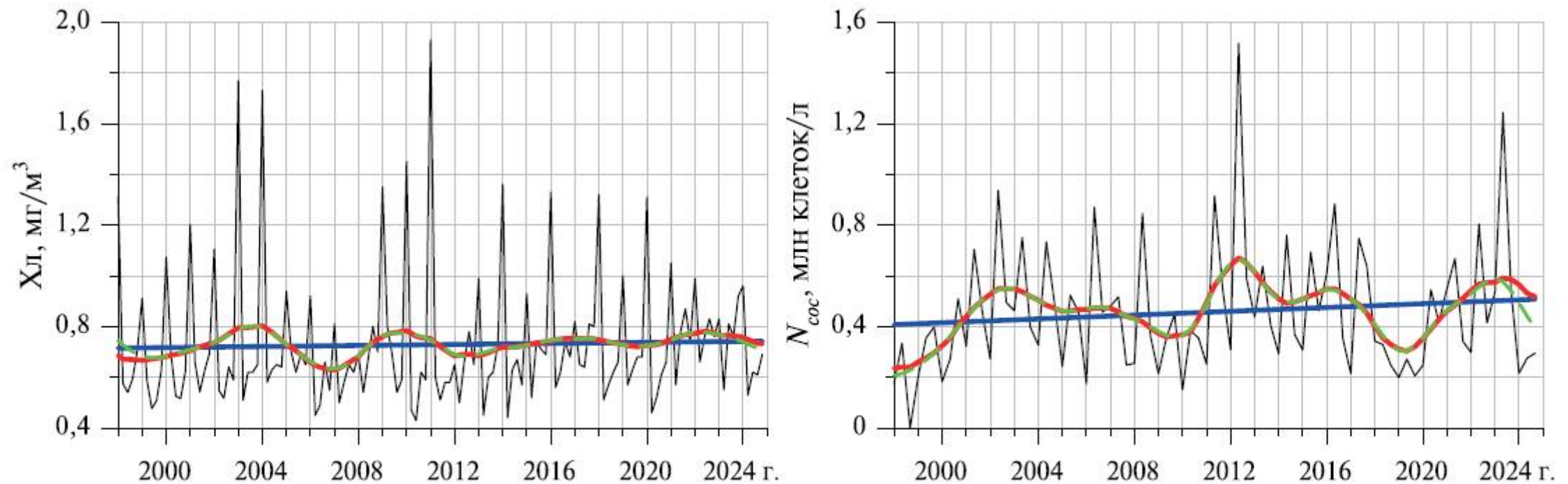


Рис. 3. Временные ряды концентрации Хл (слева) и кокколитофорид (справа) в среднем субрегионе Баренцева моря. Синими линиями показаны линейные тренды, красными — SSA, зелёными штриховыми — скользящее среднее

Баренцево море

Таблица 1. Параметры временной изменчивости характеристик в субрегионах Баренцева моря в 1998–2024 гг.

Субрегион	Характеристика	Тренд	Границы доверительного интервала ($\gamma = 95\%$)
Средний	ТПМ, °C в год	0,080	0,029...0,132
Северный	ТПМ, °C в год	0,050	0,012...0,088
Средний	Хл, мг/м ³ в год	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$-4,8...6,8 \cdot 10^{-2}$
Северный	Хл, мг/м ³ в год	$0,06 \cdot 10^{-2}$	$-0,68...8,10 \cdot 10^{-2}$
Кокколитофоридного цветения	N_{coc} , млн клеток/л в год	0,0037	-0,0034...0,0110

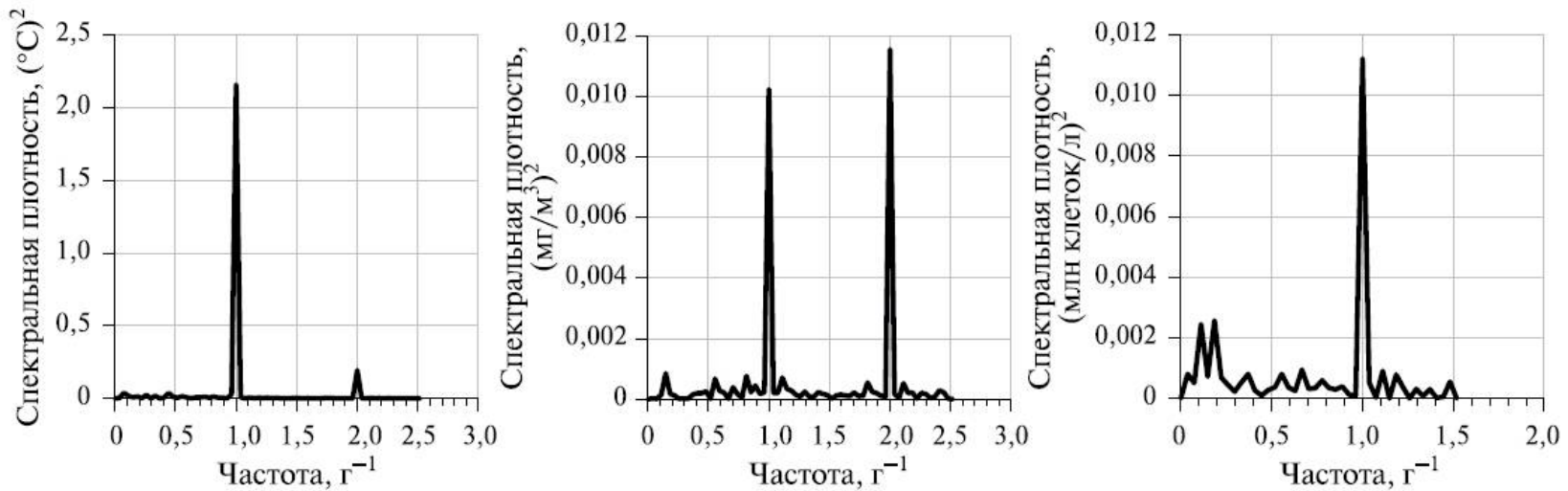


Рис. 4. Периодограммы параметров в среднем субрегионе Баренцева моря: ТПМ (слева), концентрация Хл (посередине) и кокколитофорид (справа)

Карское море

Таблица 2. Параметры временной изменчивости величин ТПМ и Хл в субрегионах Карского моря в 2003–2024 гг.

Субрегион	Характеристика	Тренд	Границы доверительного интервала ($\gamma = 95\%$)
Юго-западный	ТПМ, °C в год	0,098	0,02...0,18
Северо-восточный	ТПМ, °C в год	0,058	0,02...0,10
Юго-западный	Хл, мг/м ³ в год	$0,26 \cdot 10^{-2}$	$-0,12...0,63 \cdot 10^{-2}$
Северо-восточный	Хл, мг/м ³ в год	$-0,20 \cdot 10^{-2}$	$-0,76...0,35 \cdot 10^{-2}$

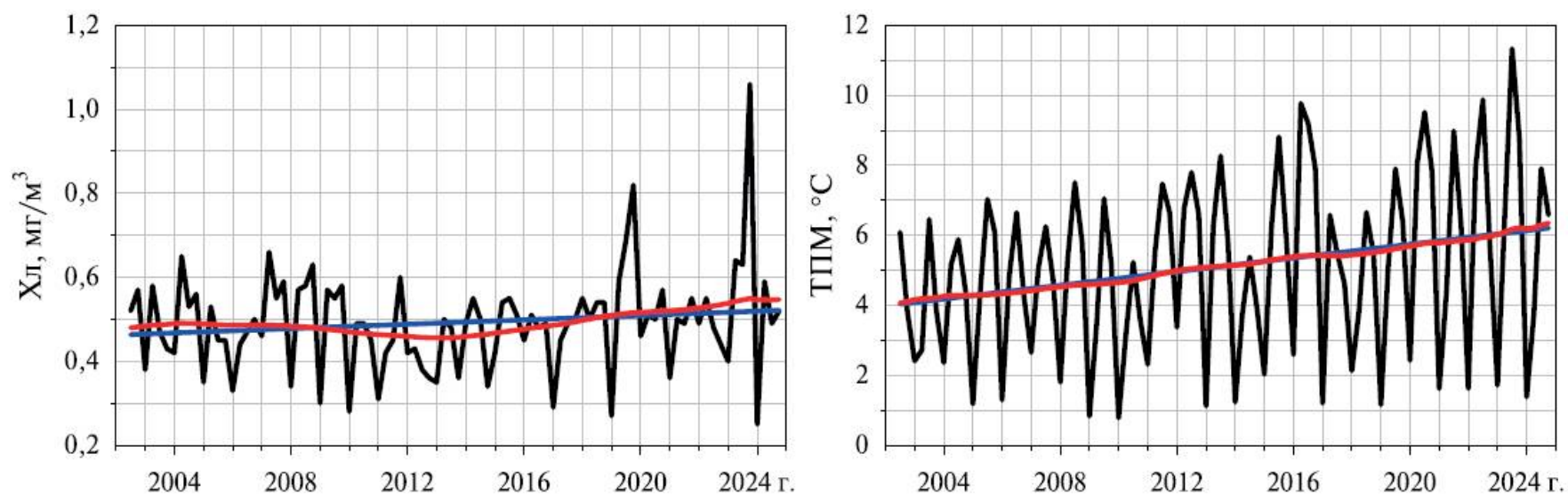


Рис. 5. Временные ряды величин Хл (слева) и ТПМ (справа) в юго-западном субрегионе Карского моря. Синими линиями показаны линейные тренды, красными — SSA

Квантильная регрессия

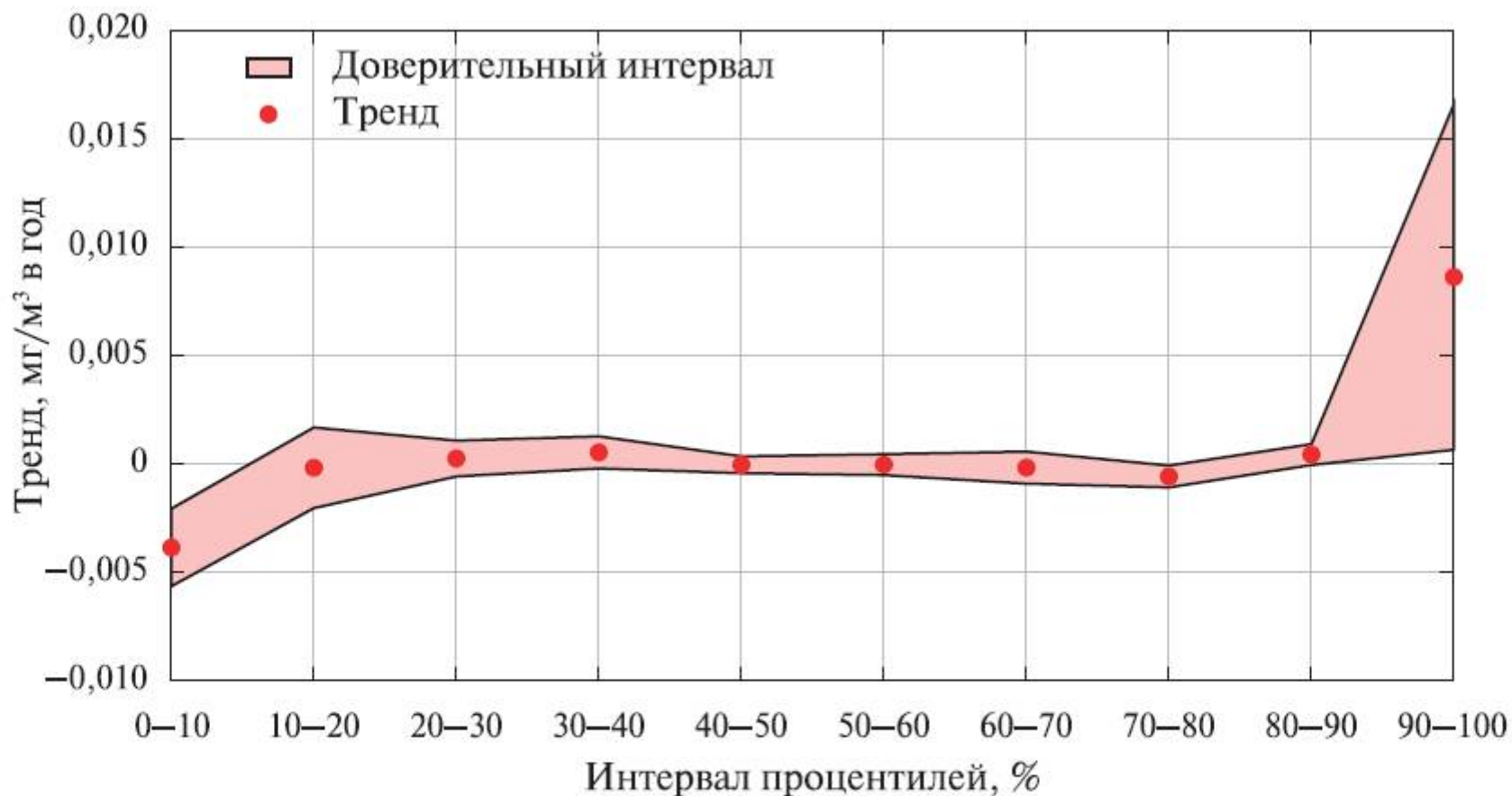


Рис. 6. Тренды концентрации Хл в юго-западном субрегионе Карского моря для интервалов процентилей распределения с шагом в 10 % при значении доверительной вероятности 75 %, 2002–2024 гг. Цветной заливкой показаны границы доверительных интервалов

Заключение

- По данным о среднемесячных значениях биооптических характеристик, полученных с использованием региональных алгоритмов ИО РАН, выполнен расчет трендов их временной изменчивости за четверть века.
- Значимые тренды зафиксированы лишь для ТПМ.
- В большинстве случаев изменения биооптических характеристик в рассматриваемый период не имеют систематического характера.
- Для концентрации Хл в среднем субрегионе Баренцева моря были зарегистрированы колебания с периодом 6–7 лет.
- В юго-западном субрегионе Карского моря получены значимые тренды в квантилях, включающих 10 % наибольших и наименьших значений ряда концентрации хлорофилла а.
- Задача дальнейшего проведения исследований заключается в том, чтобы уточнить положение границ регионов, наиболее показательных для анализа межгодовой изменчивости биооптических характеристик.

Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № __. С. ____–____

Межгодовая изменчивость биооптических характеристик Баренцева и Карского морей

Д. И. Глуховец^{1,2}, И. В. Салинг¹, С. В. Вазюля¹, С. В. Шеберстов¹

¹ Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

² Московский физико-технический институт (НИУ)

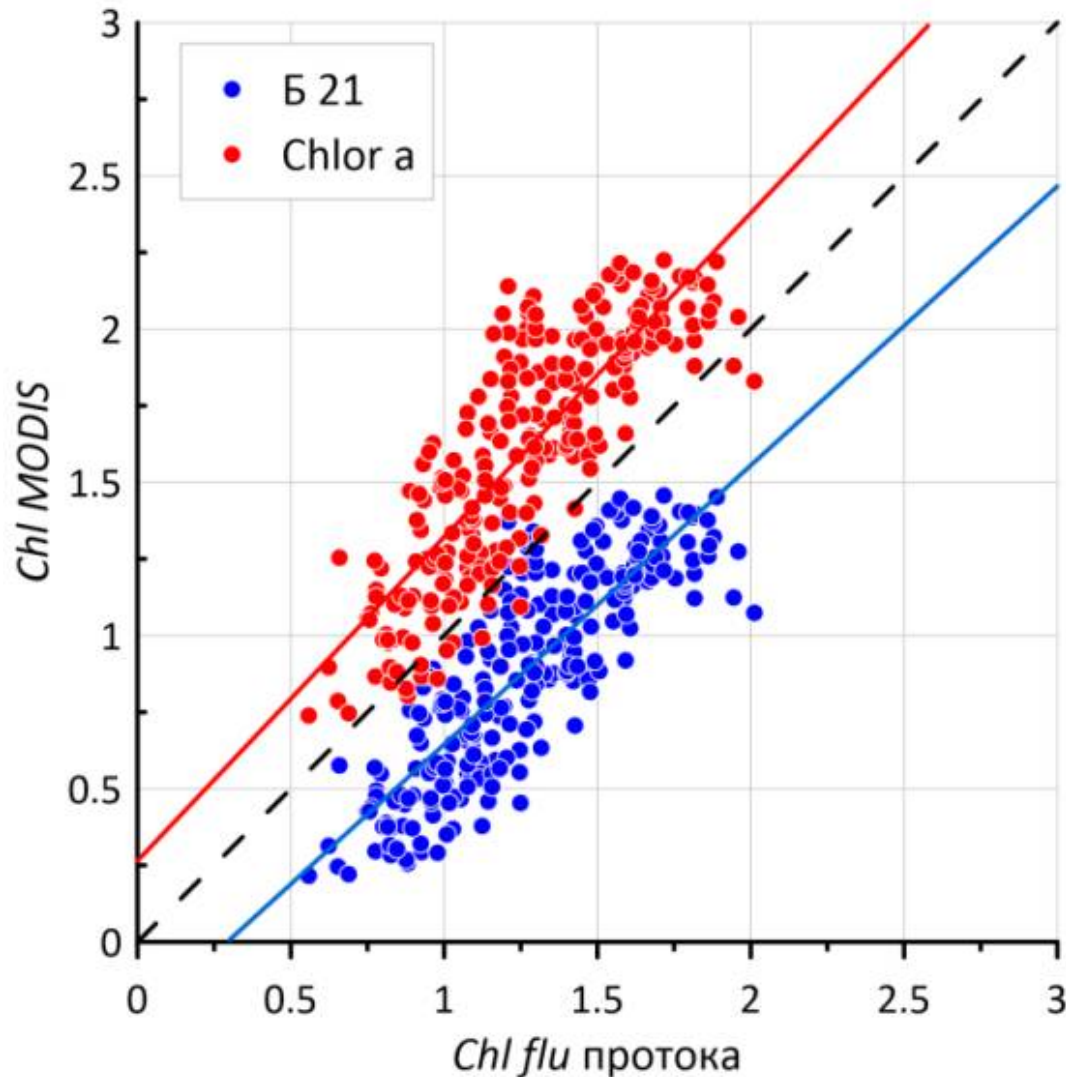
Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия

E-mail: glukhovets@ocean.ru



Дмитрий Глуховец
glukhovets@ocean.ru

Региональный алгоритм оценки концентрации хлорофилла для Баренцева моря



$$Chl = 1.97 [R_{rs}(531) / R_{rs}(547)]^{-7.76}.$$

- Используемый ранее региональный алгоритм Б98 был создан на основе судовых измерений в 13 и 14 рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов», август – сентябрь 1998 г. Большая часть натурных измерений была выполнена в Печорском море с высоким содержанием ОРОВ. Использование этого алгоритма в открытой акватории Баренцева моря приводило к большим ошибкам (Каралли, Вазюля, 2021).
- Точность усовершенствованного регионального алгоритма Б22 близка к точности прямых определений этой величины экстракционными методами (около 30 %).