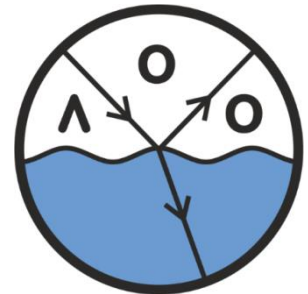




Двадцать третья международная конференция
"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"
ИКИ РАН, 10 ноября 2025 г.

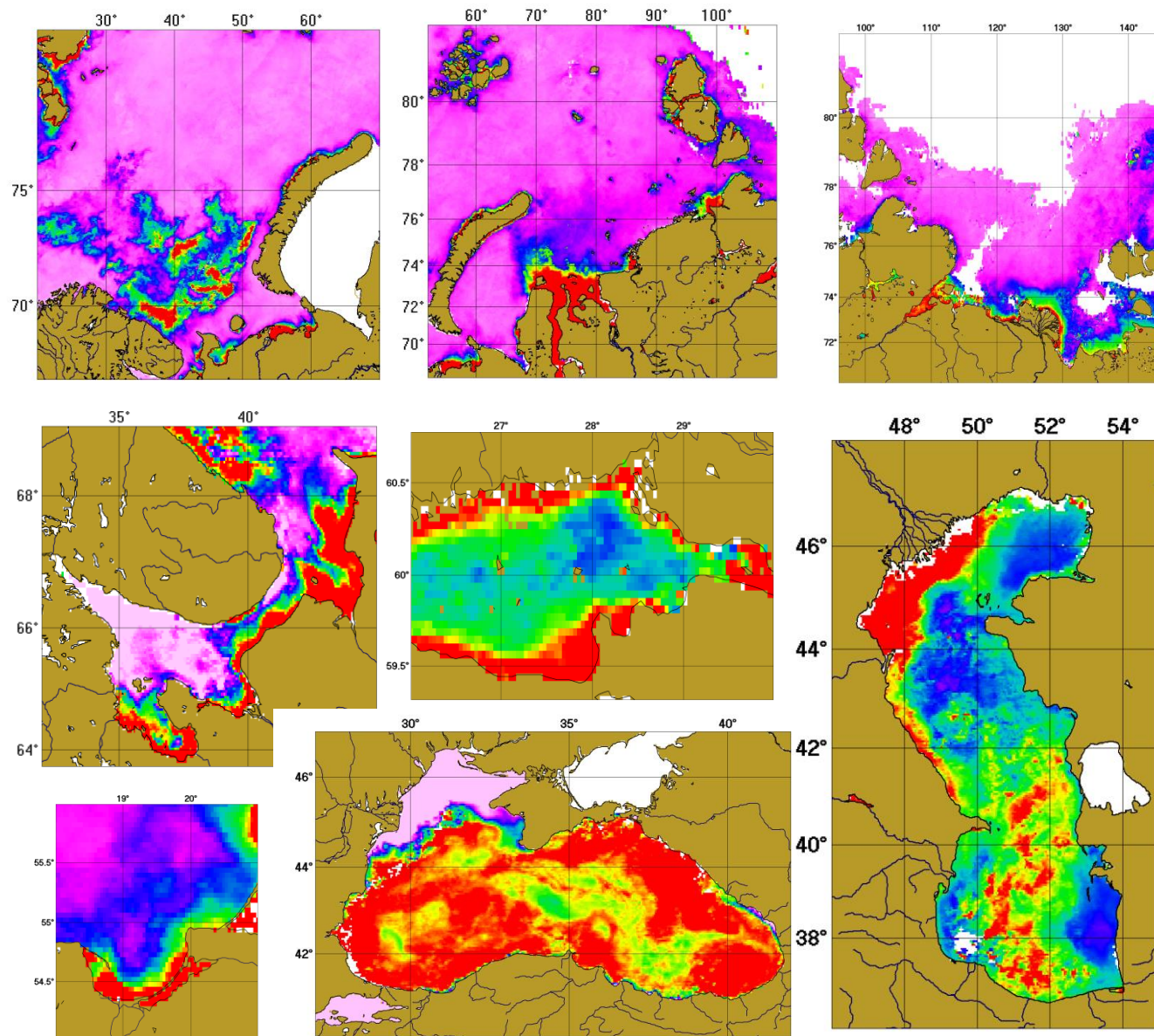
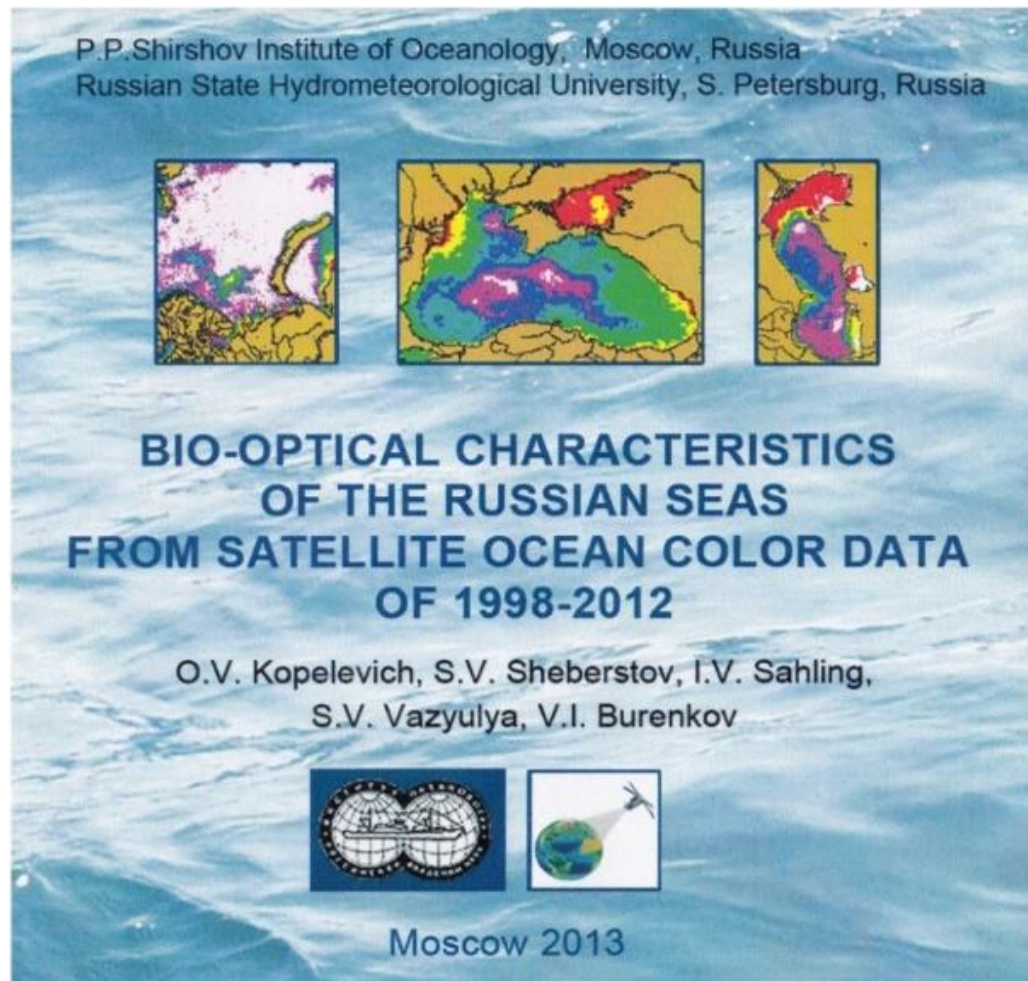


Атлас биооптических характеристик семи российских морей по данным спутниковых сканеров цвета

Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Салинг И.В., Буренков В.И.
vasyulya.sv@ocean.ru

Атлас биооптических характеристик ИО РАН

2



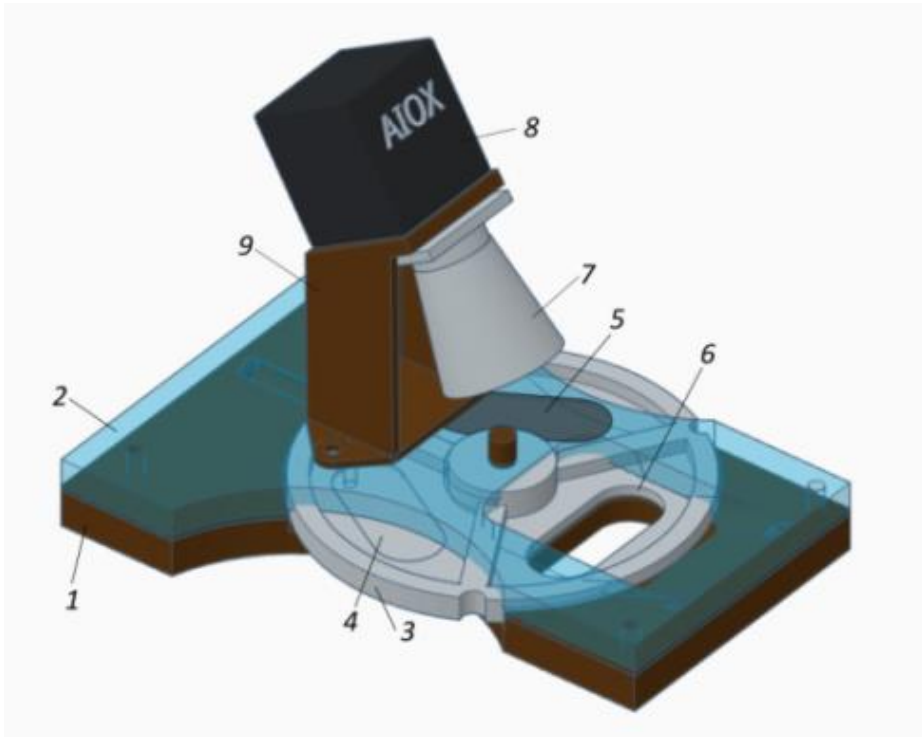
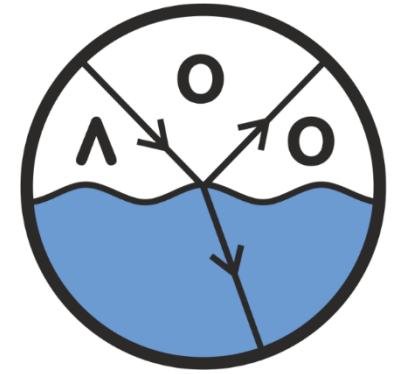
<https://optics.ocean.ru>

Лаборатория оптики океана

3

Традиционные задачи ЛОО:

- разработка гидрооптической аппаратуры,
- экспериментальные исследования световых полей,
- изучение географических особенностей биооптических характеристик морской воды.



**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



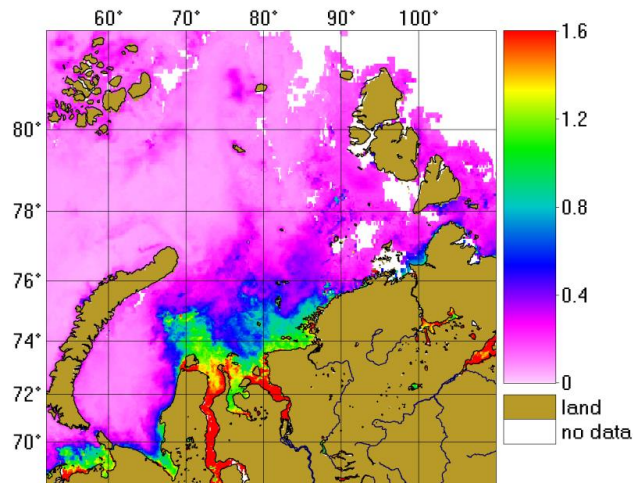
Биооптические характеристики вод

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

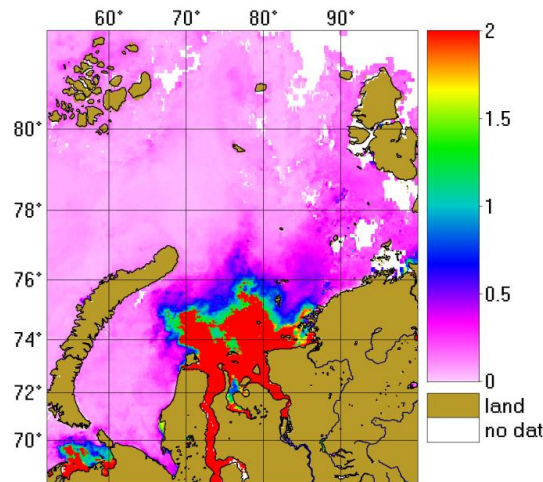
О.В. Копелевич и др., 2018

Карское море, июль 2025

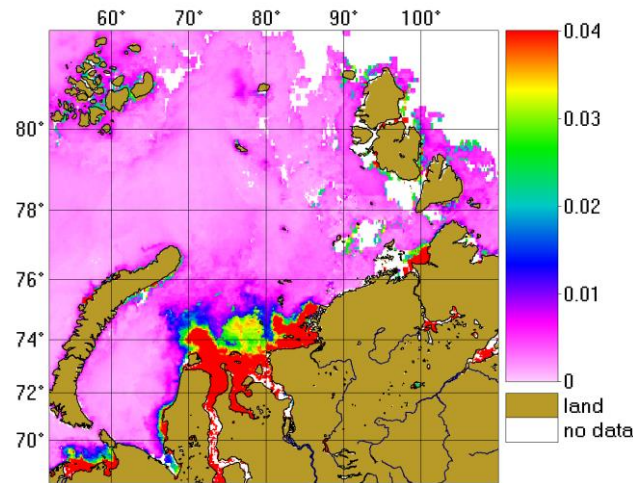
Chl, мг/м³



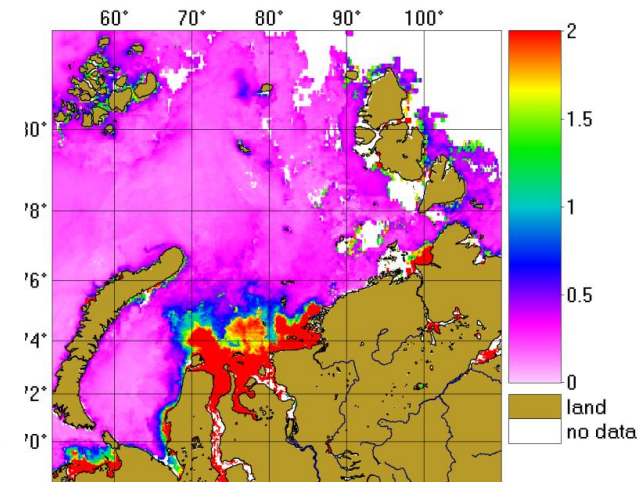
$a_g(443)$, 1/м



$b_{bp}(555)$, 1/м



TSM, мг/л

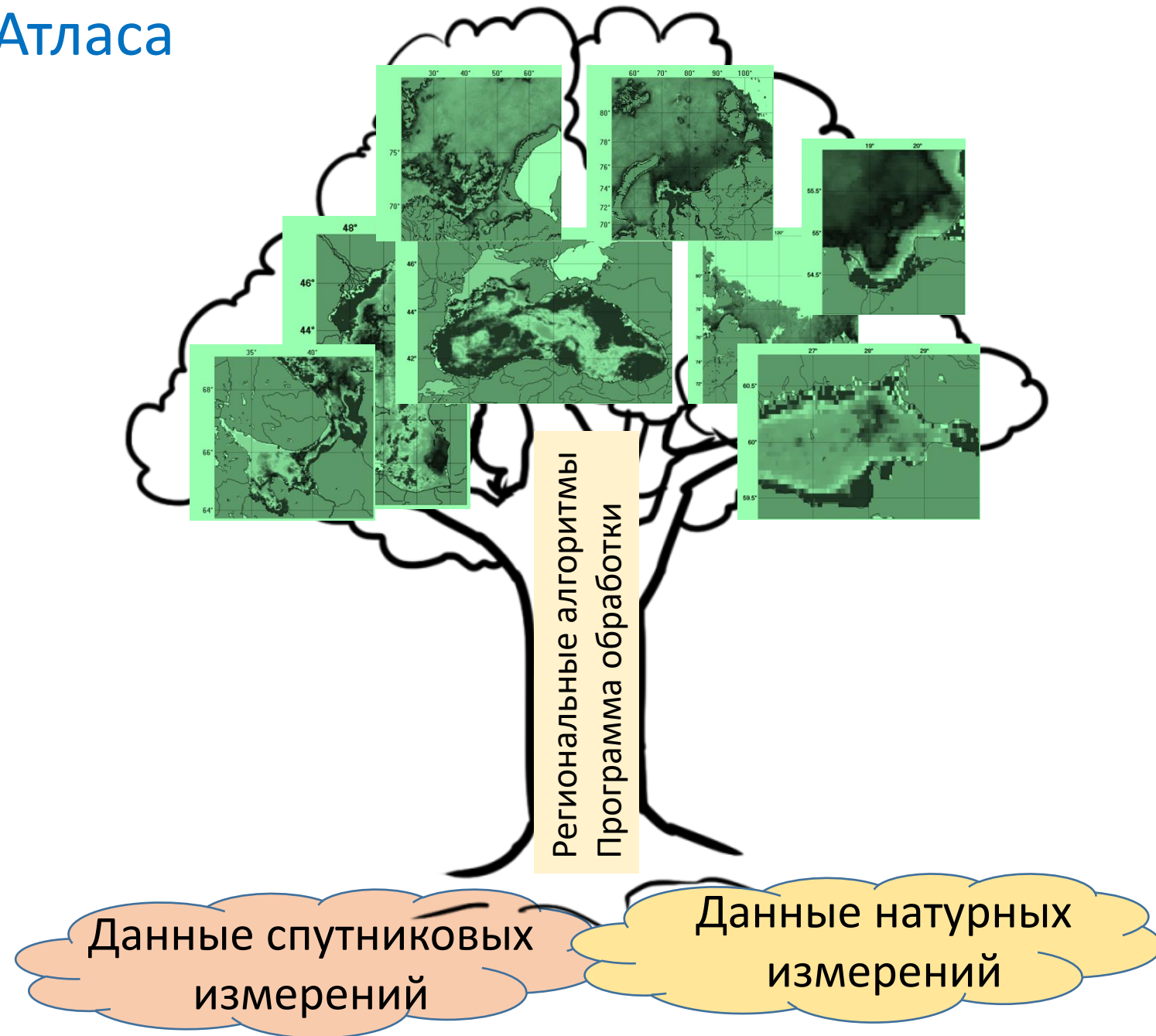


Биооптические параметры

Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости моря R_{rs}	Характеризует пространственно-временную изменчивость свойств поверхностного слоя водной толщи; входной параметр для всех остальных биооптических алгоритмов
Концентрация хлорофилла Chl	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевая характеристика для расчета первичной биопродукции и оценки углеродного насоса
Показатель поглощения OPOB 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 и определяет карбонатный насос

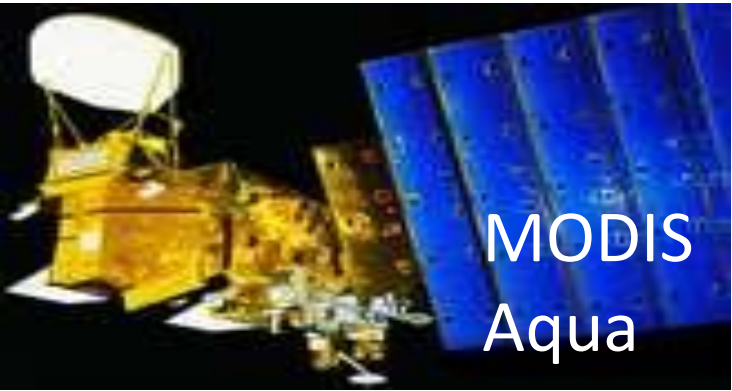
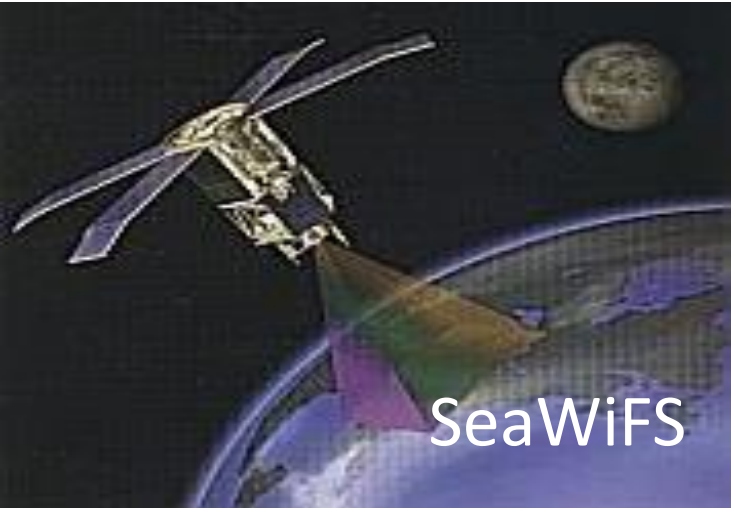
Рецепт создания Атласа

6



6

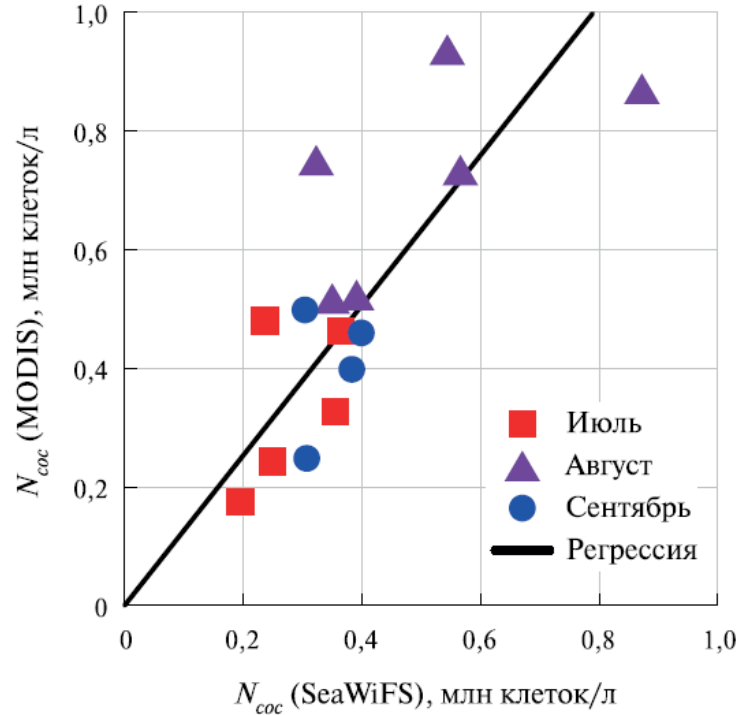
Сканеры цвета океана



Данные доступны на сайте
<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>

Сканер	SeaWiFS	MODIS Aqua
Спутник	OrbView-2	Aqua (EOS-PM1)
Время работы	август 1997 – февраль 2011	май 2002 – настоящее время
Полоса обзора (км)	2806	2330
Разрешение L2 (км)	1.1 LAC 4 GAC	1
Разрешение L3 (км) (Салинг и др., 2023)	9	4
Число спектральных каналов	8 (8)	36 (9)

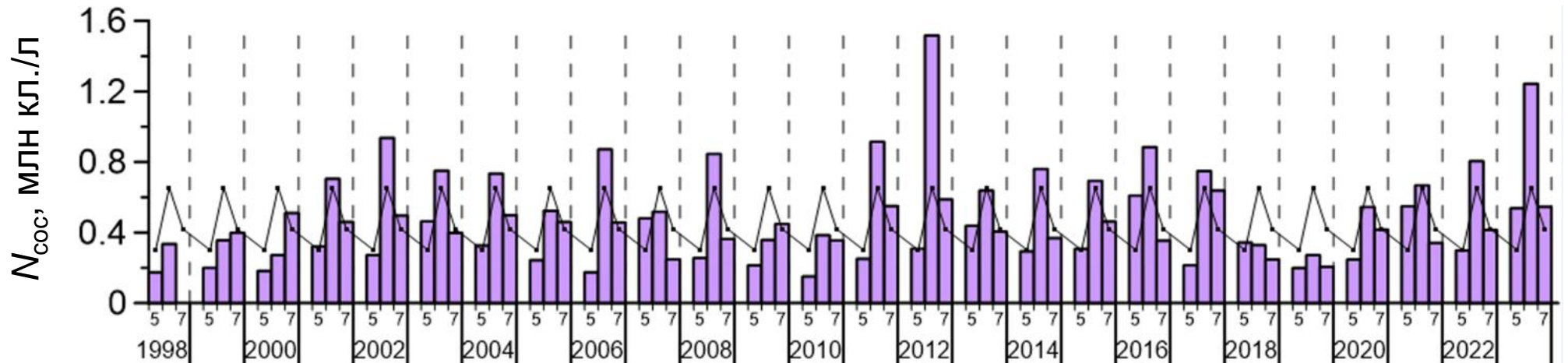
Объединение данных сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua

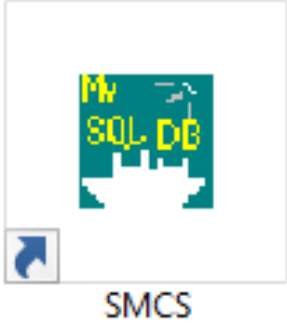


Сопоставление величин концентрации кокколитофорид N_{coc} (млн кл./л), рассчитанных по данным сканеров цвета SeaWiFS и MODIS-Aqua в регионе кокколитофоридного цветения в Баренцевом море, **июль-сентябрь 2002-2007 гг.**

Среднемесячные величины концентрации кокколитофорид N_{coc} в **Баренцевом море.**

Черная кривая – средние изменения за период 1998–2022 гг.

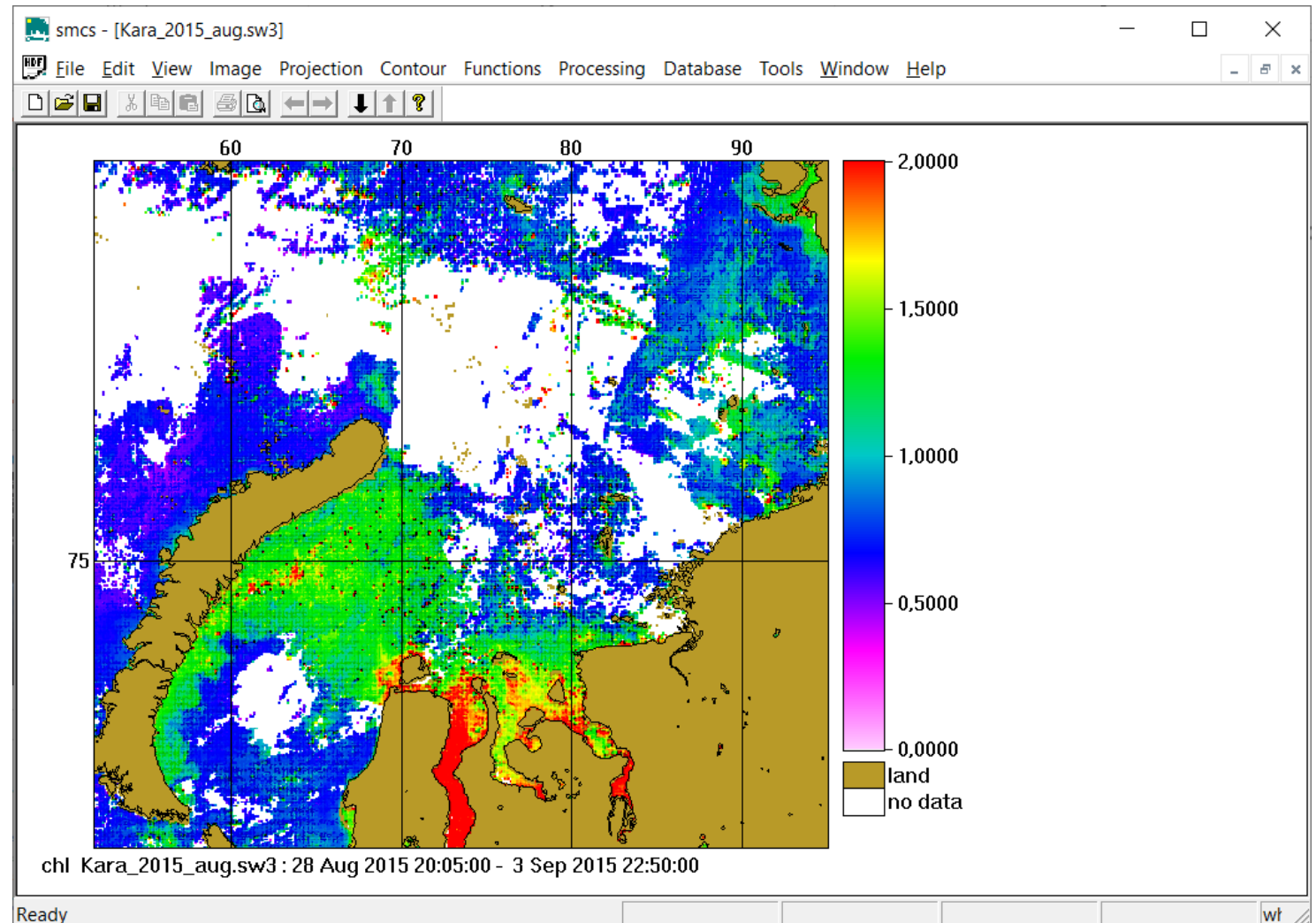




Пакет программ SMCS

Пакет программ для обработки данных спутниковых сканеров цвета, разработанный в Лаборатории оптики океана ИО РАН

Шеберстов С.В. Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 87–94.



Региональные алгоритмы

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

**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



НИС Академик Мстислав Келдыш

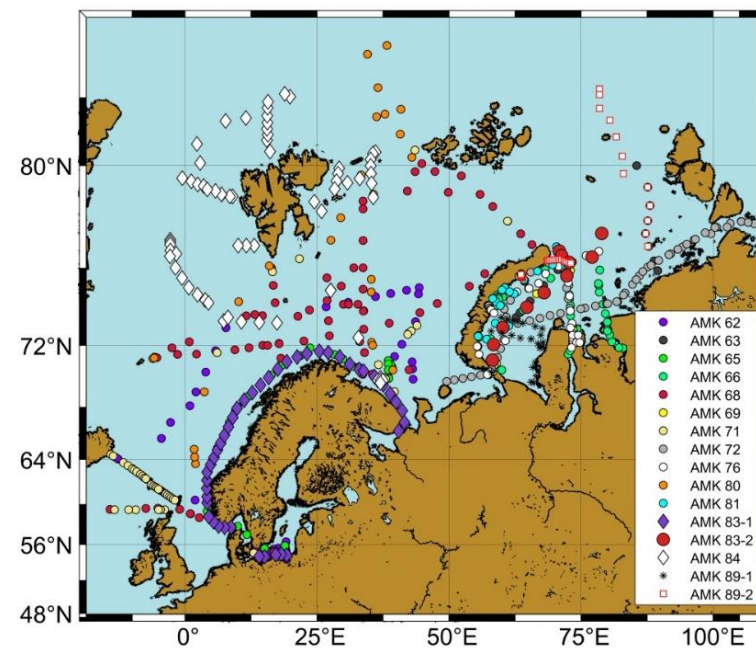
Работа на станциях

- Зондирования
- Измерения коэффициента яркости моря
- Отбор проб

Непрерывные измерения на ходу судна

- Проточный комплекс
- Световые поля
- Измерения коэффициента яркости моря

Карта станций
2015-2022 гг.

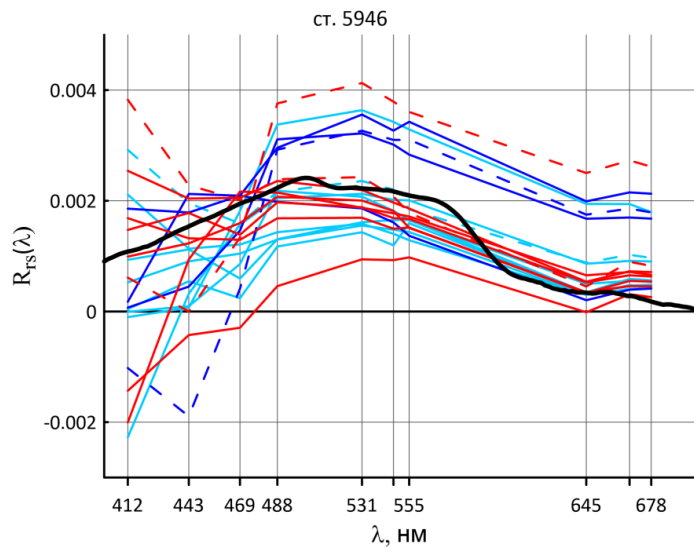


Аппаратура для проведения судовых измерений

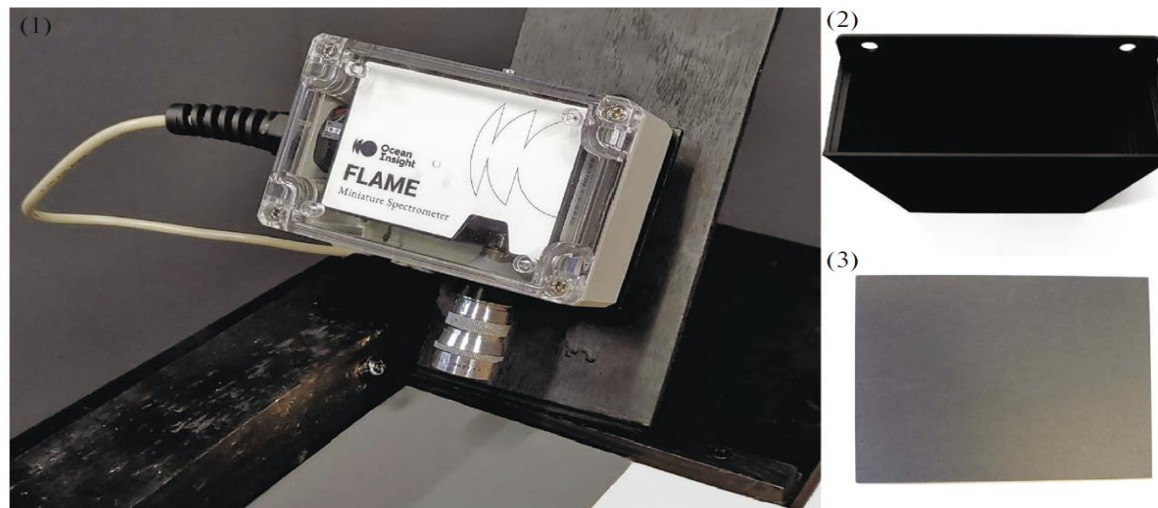
12



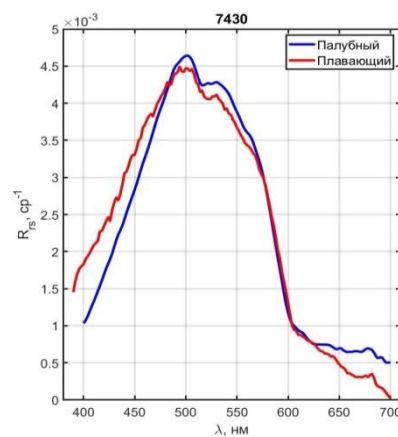
плавающий спектрорадиометр



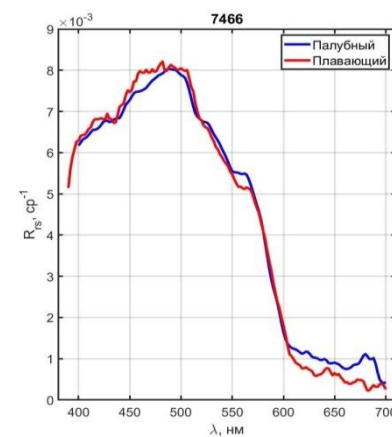
море Лаптевых, 2018 г.



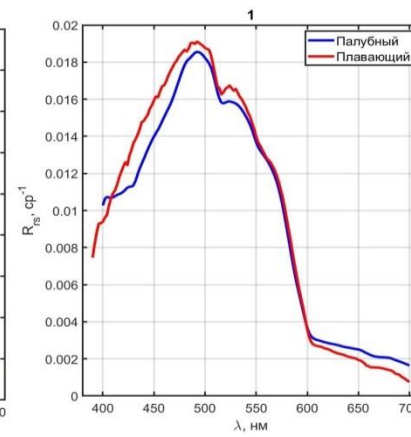
палубный спектрорадиометр



Карское море,
2022 г.



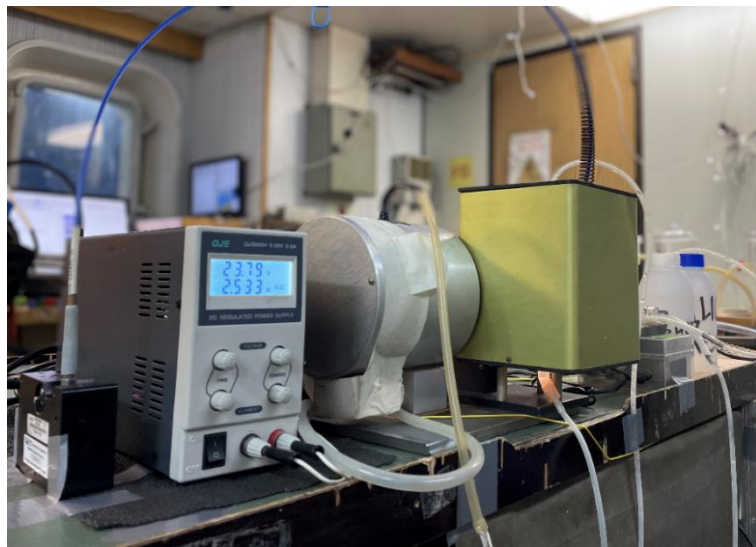
Баренцево море,
2022 г.



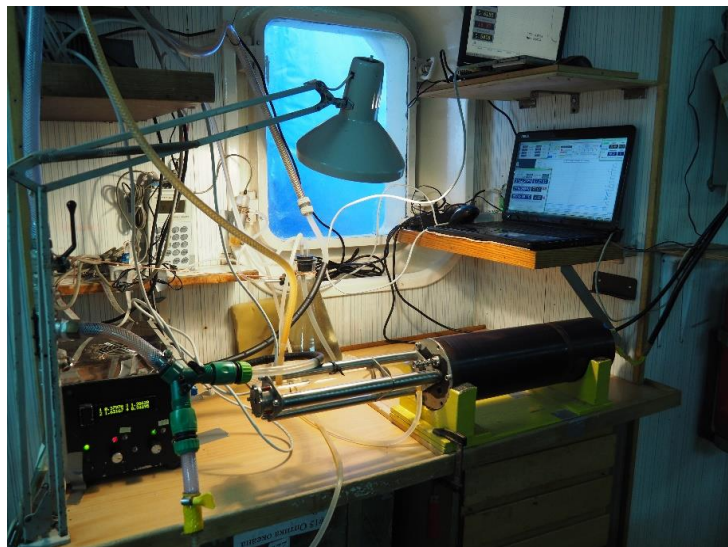
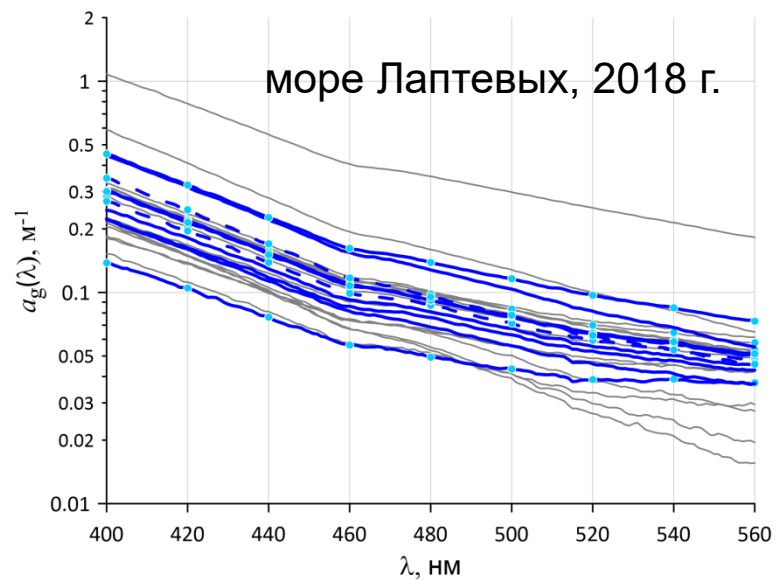
Черное море,
2023 г.

Аппаратура для проведения судовых измерений

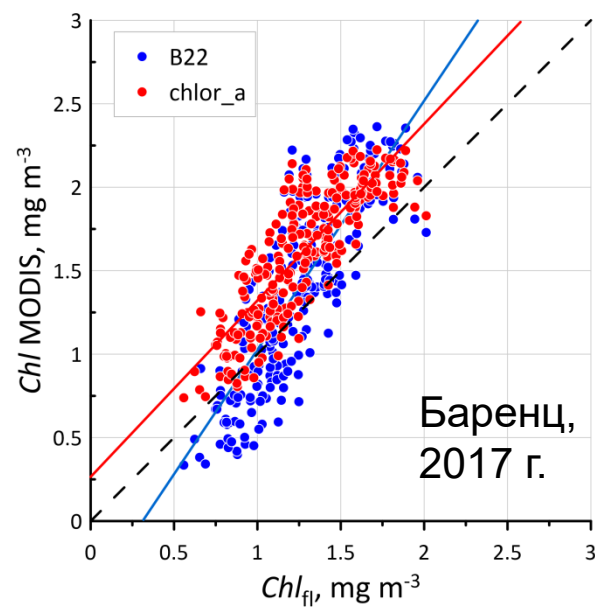
13



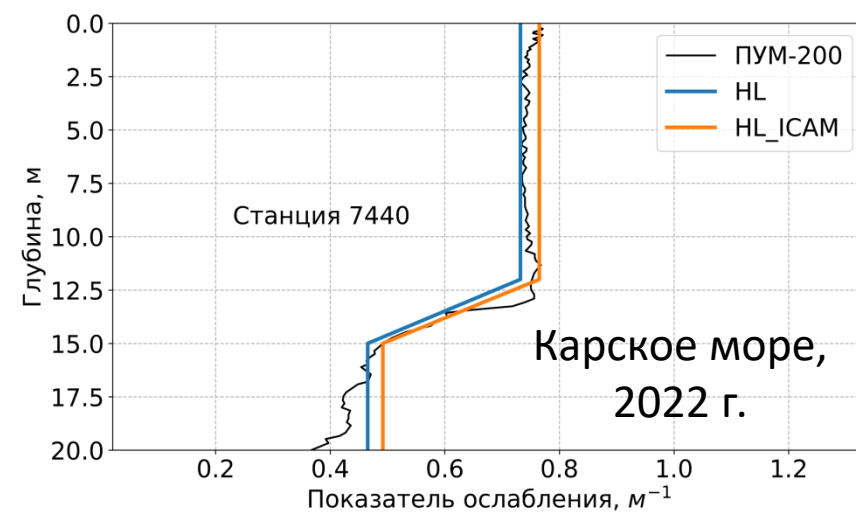
интегрирующая сфера



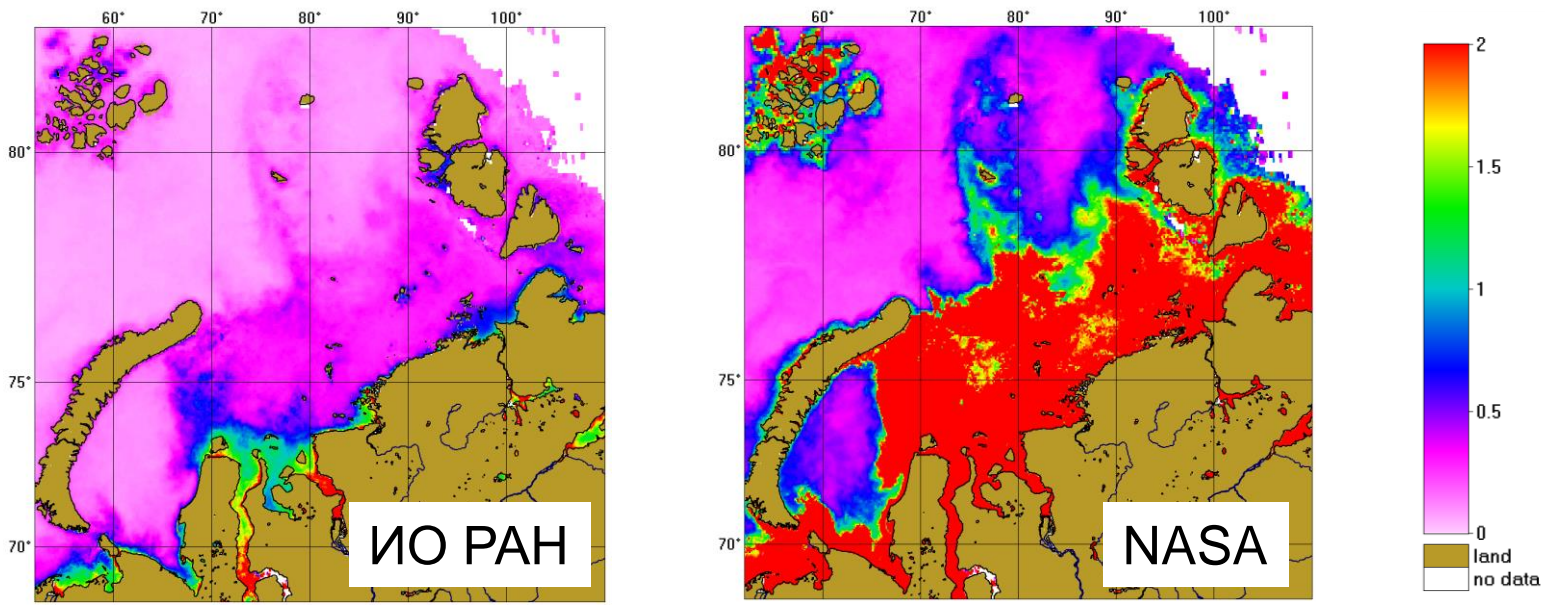
проточный комплекс



прозрачномер



Необходимость разработки региональных алгоритмов

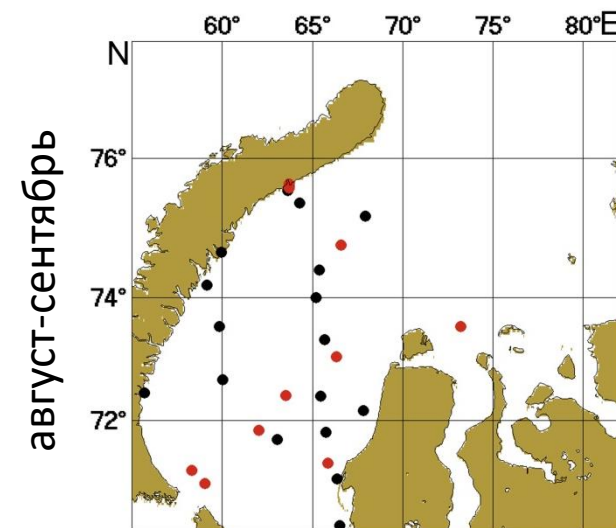
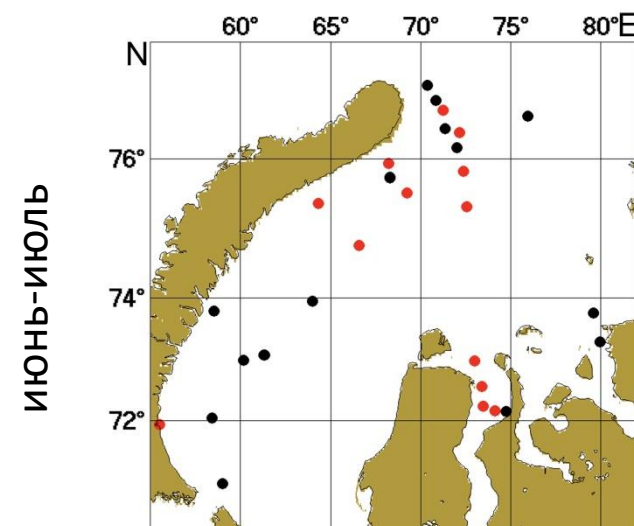


Среднемесечные распределения концентрации хлорофилла a (мг м^{-3}) в Карском море в августе 2025 г. по данным спутникового сканера цвета MODIS.

Средняя относительная ошибка алгоритма ИО РАН - **60 %**, NASA – **540 %**.
 Vazyulya S.V. et al. Regional algorithms for chlorophyll concentration estimation in the Kara Sea from MODIS ocean color data // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 37. P. S135–S143.

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

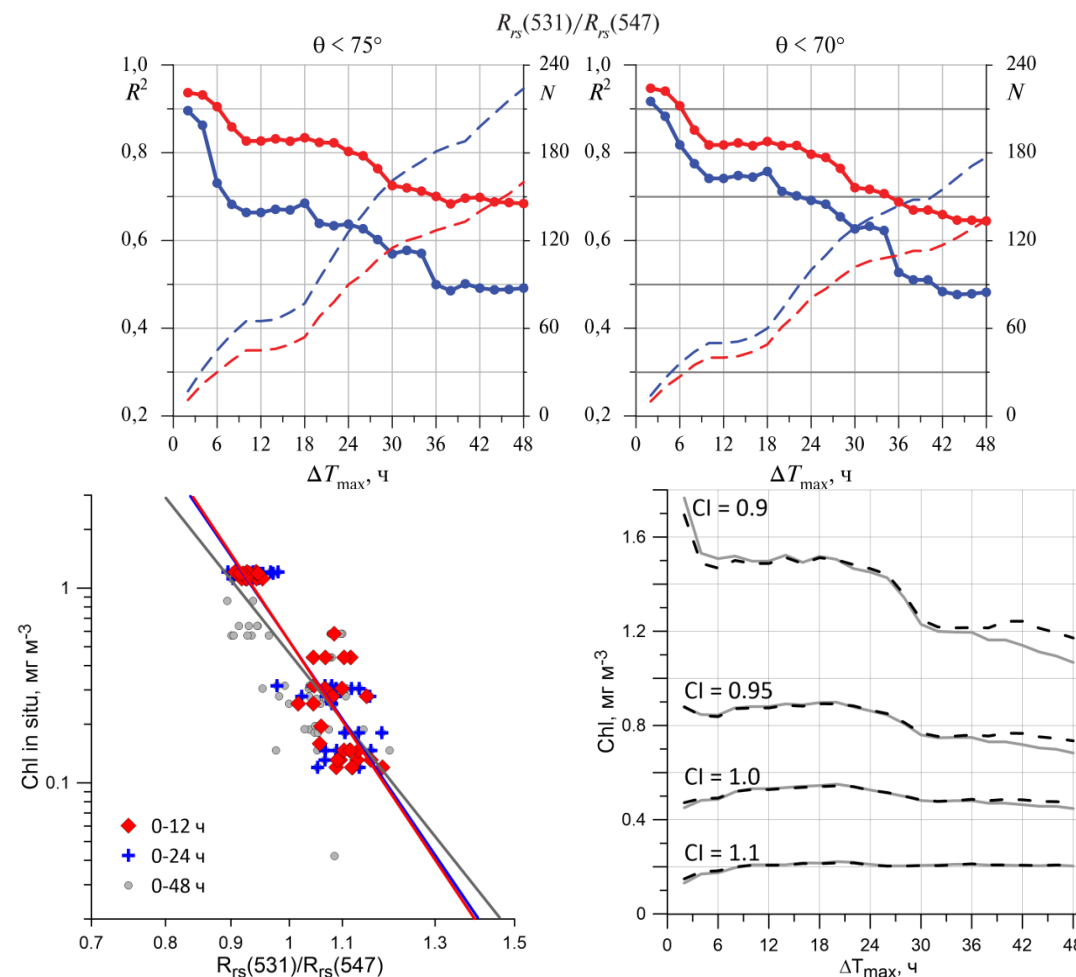
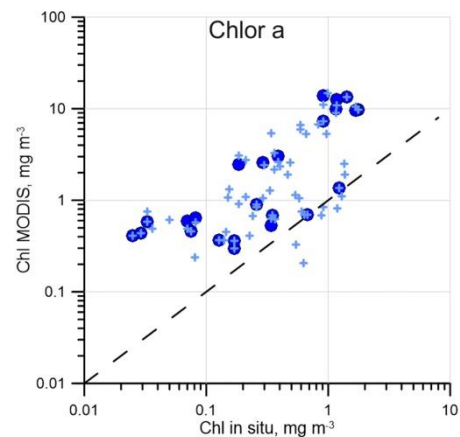
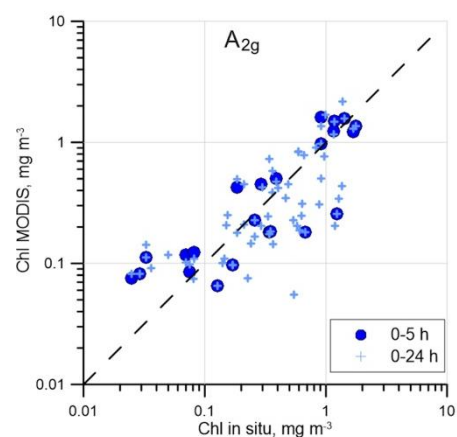
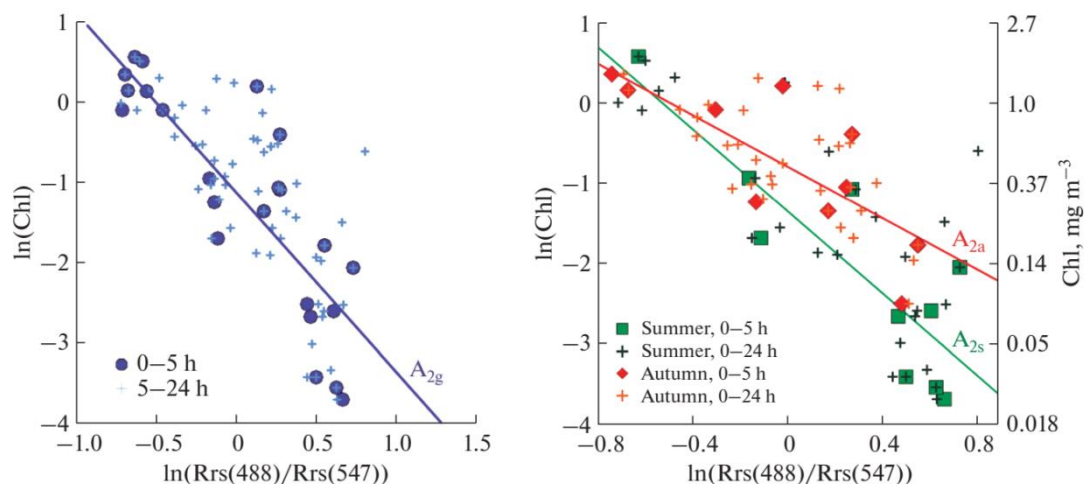
Станции в Карском море 2007-2022



Регрессионные региональные алгоритмы

Vazyulya S.V. et al. Regional algorithms for chlorophyll concentration estimation in the **Kara Sea** from MODIS ocean color data // Atmospheric and Oceanic Optics. **2024**. V. 37. P. S135–S143.

Вазюля С.В. и др. Алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* в **море Лаптевых** по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. **2025**. Т. 22. № 4. С. 87-97.



Полуаналитические алгоритмы ИО РАН

Особенности алгоритма RSA для арктических морей

- Не используются спектральные каналы 412, 443 и 469 нм
- Концентрации хлорофилла-*a* – входной параметр
- Итерационный подход к определению показателя спектрального наклона S для $a_g(\lambda)$
- В результате определяются S , $a_g(\lambda)$, $b_{bp}(\lambda)$

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

где $X = b_b / (a + b_b)$.

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

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

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

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

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

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

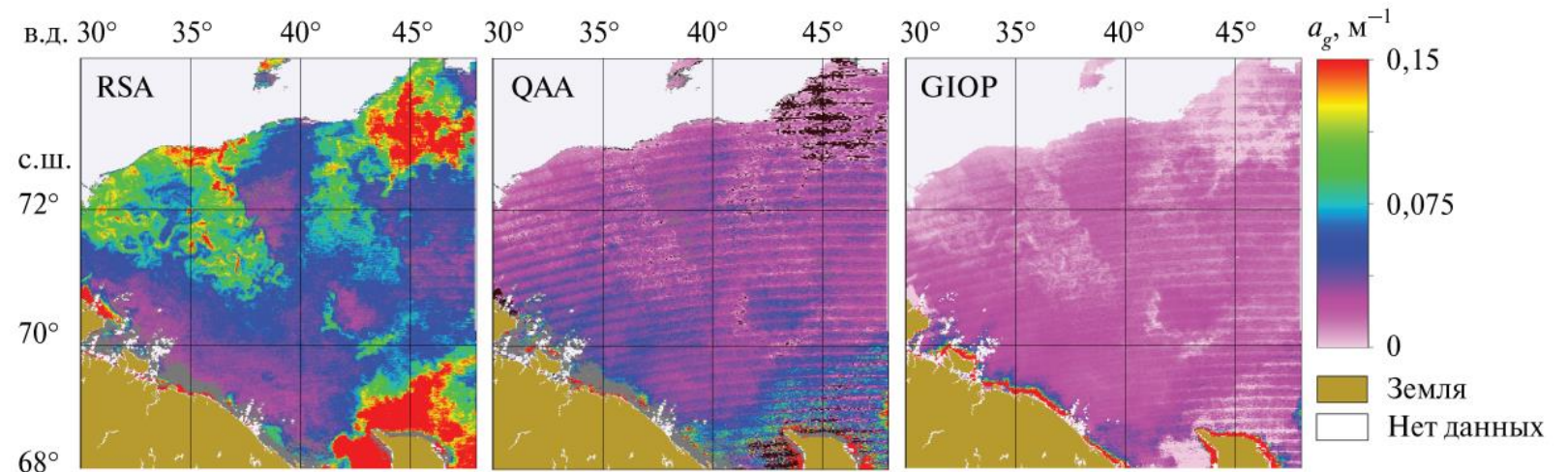


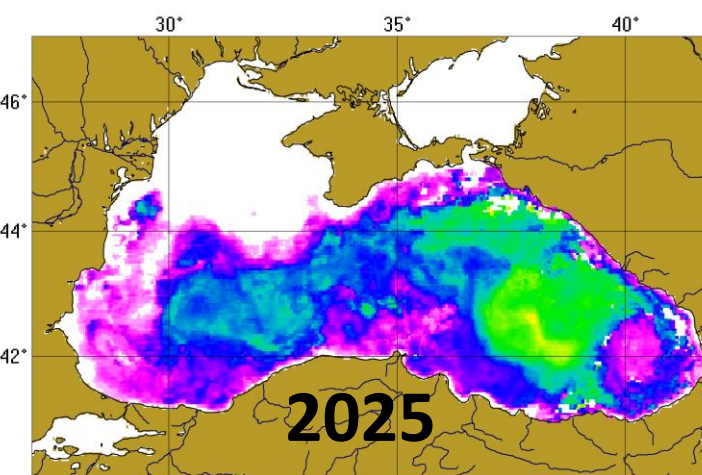
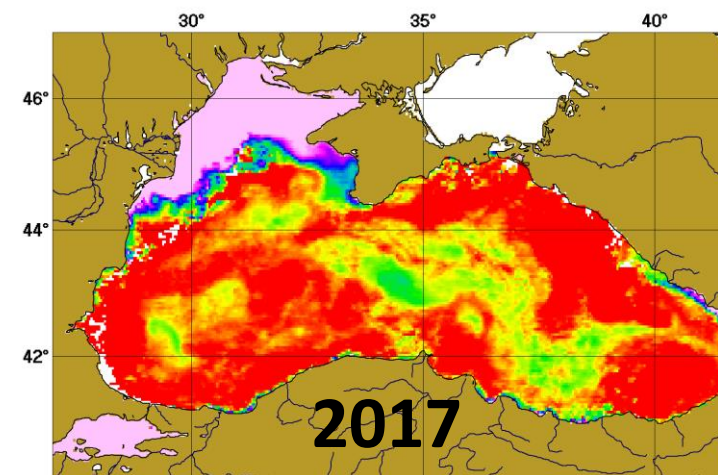
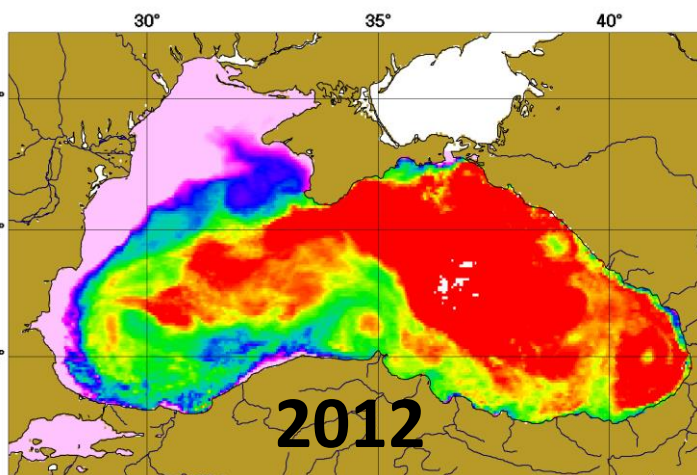
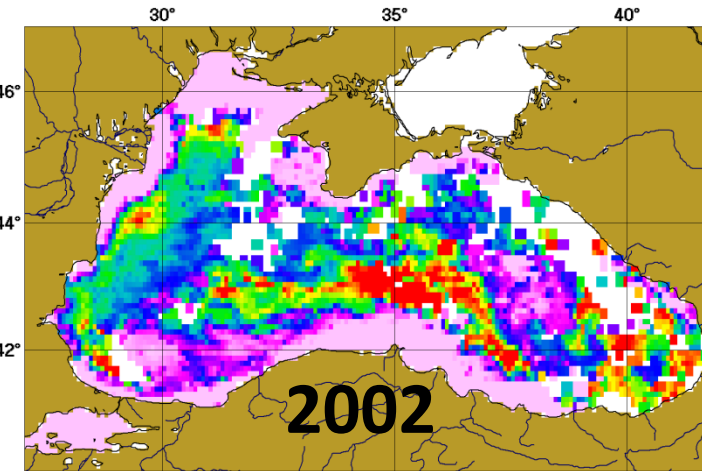
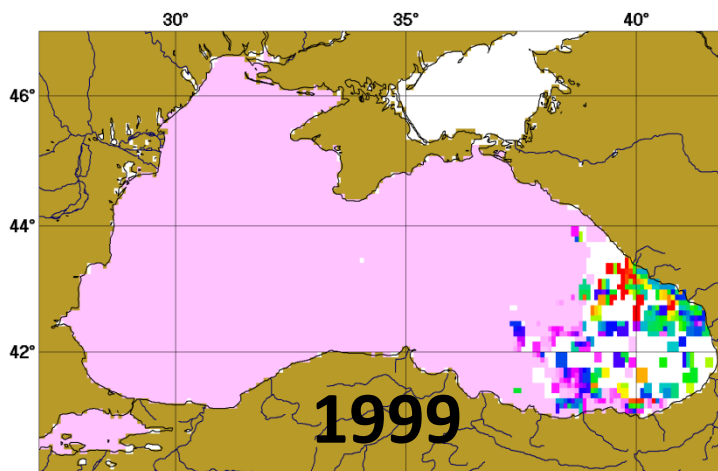
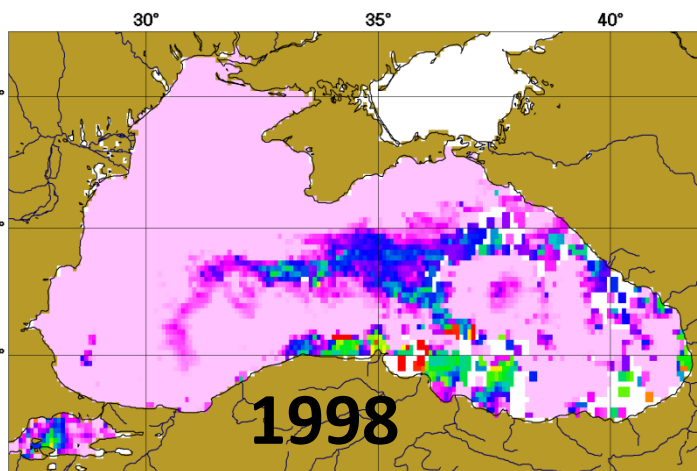
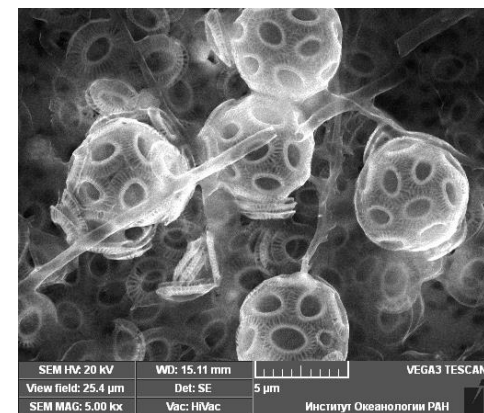
Рис. 5. Карты пространственного распределения показателя поглощения ОРОВ для алгоритмов RSA, QAA и GIOP во время 1-го этапа экспедиции АМК 83, 12 июня 2021 г.

Кокколитофориды в Черном море

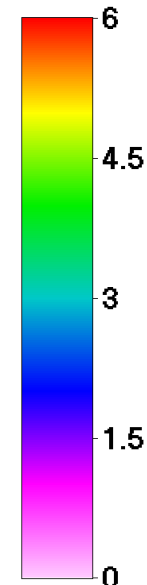
17

Среднемесячные **июньские**
распределения по данным
SeaWiFS
и MODIS-Aqua

Кокколитофориды (Coccolithophore) -
одноклеточные водоросли с клетками, покрытыми
дискообразными частицами (**coccoliths**),
состоящими из карбоната кальция CaCO_3 .



N_{coc}
МЛН КЛ./Л



land
no data

Кокколитофориды в Баренцевом море

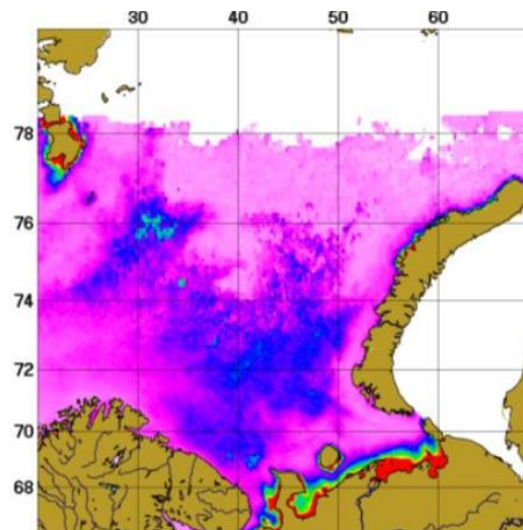
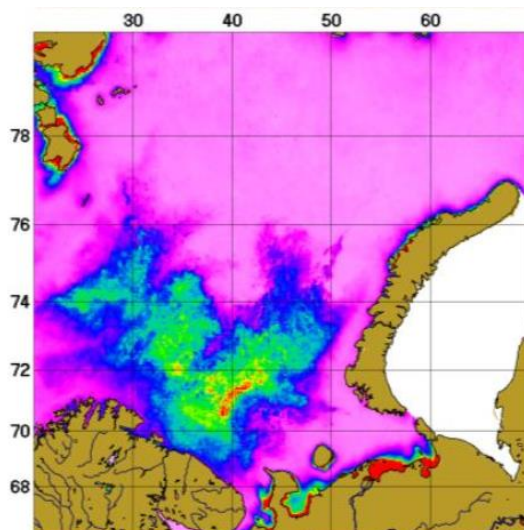
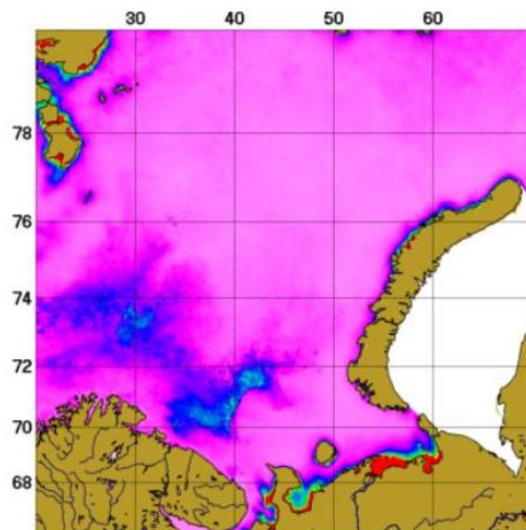
18

2003-
2023

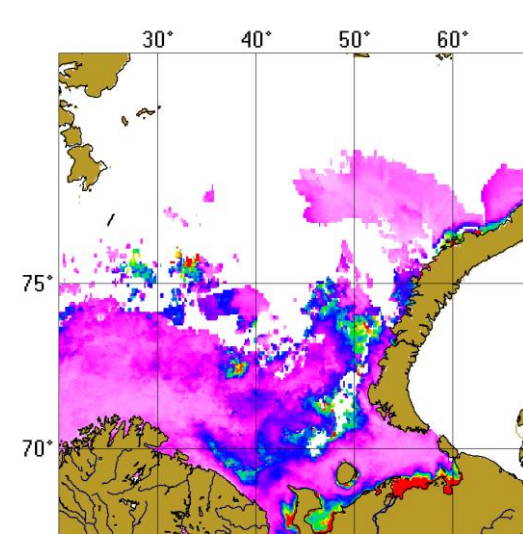
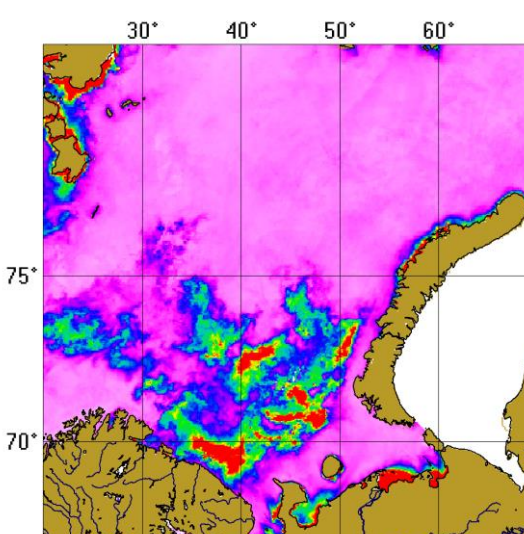
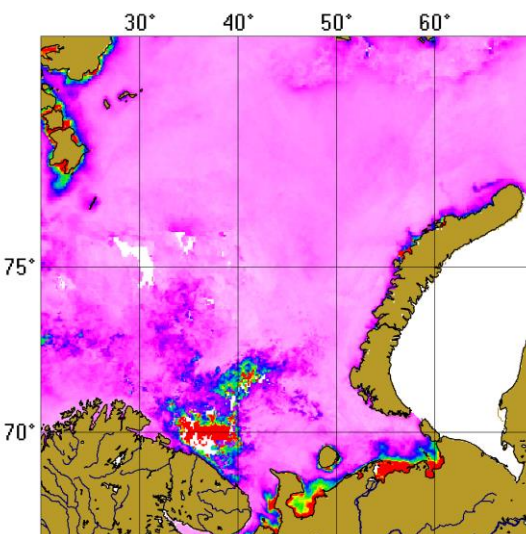
июль

август

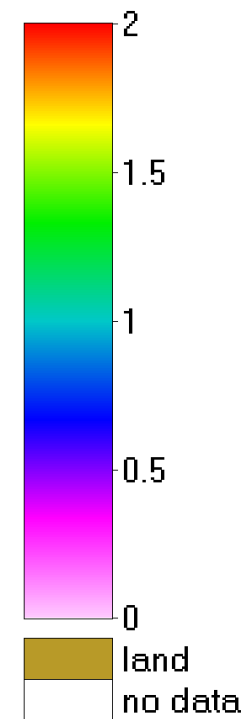
сентябрь



2025

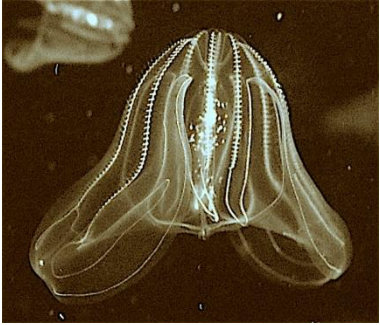


N_{coc} ,
МЛН КЛ./Л

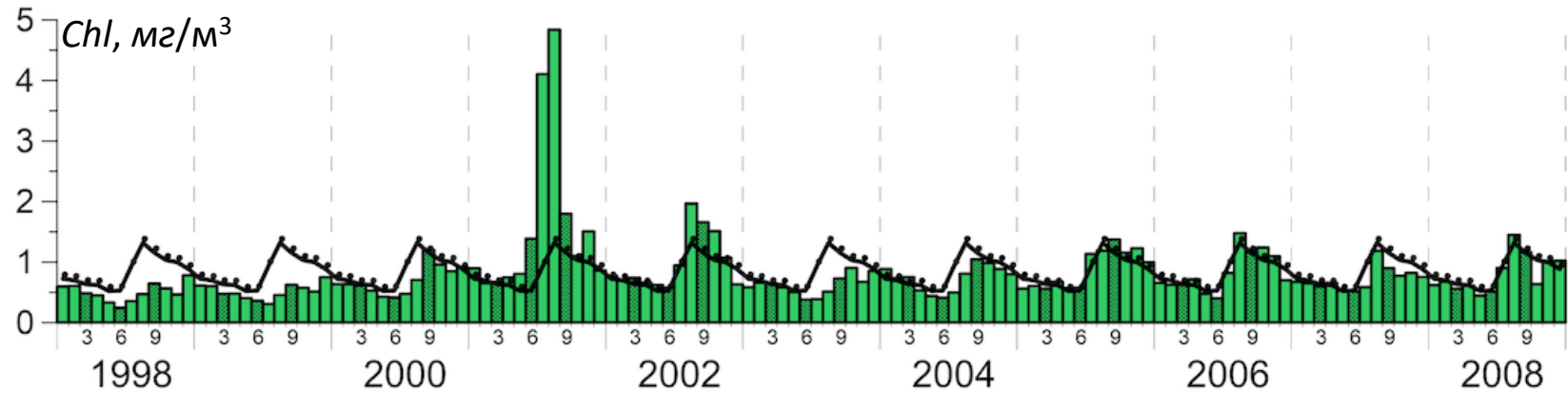


18

Вселение гребневика мнемипсиса в Каспийское море

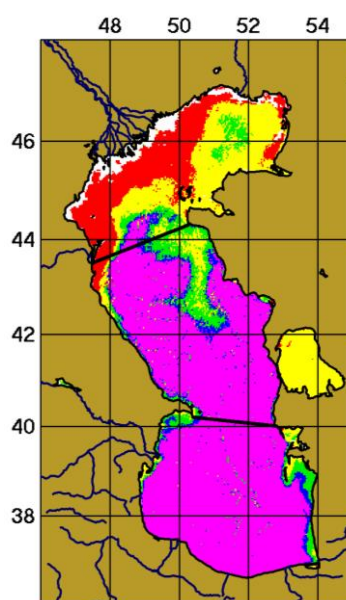


Mnemiopsis leidyi

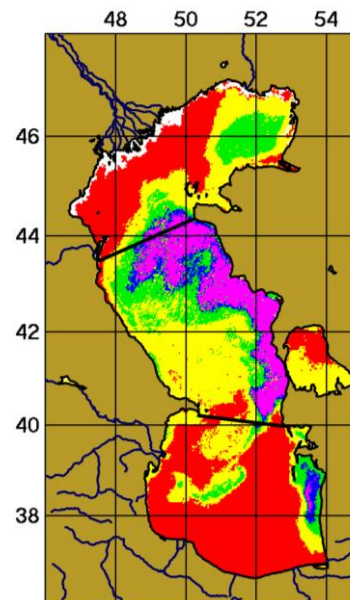


Среднемесячные величины концентрации хлорофилла в Южном регионе Каспийского моря. Кривая – средне-климатические изменения за период 1998–2011 гг.

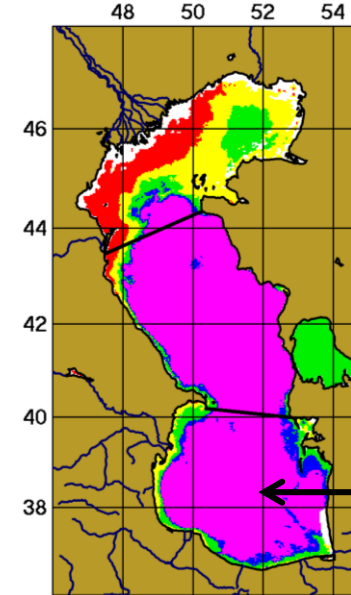
Данные
MODIS-Aqua,
Август



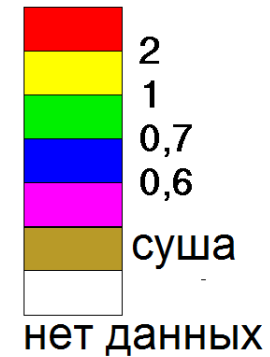
1999 г.



2001 г.



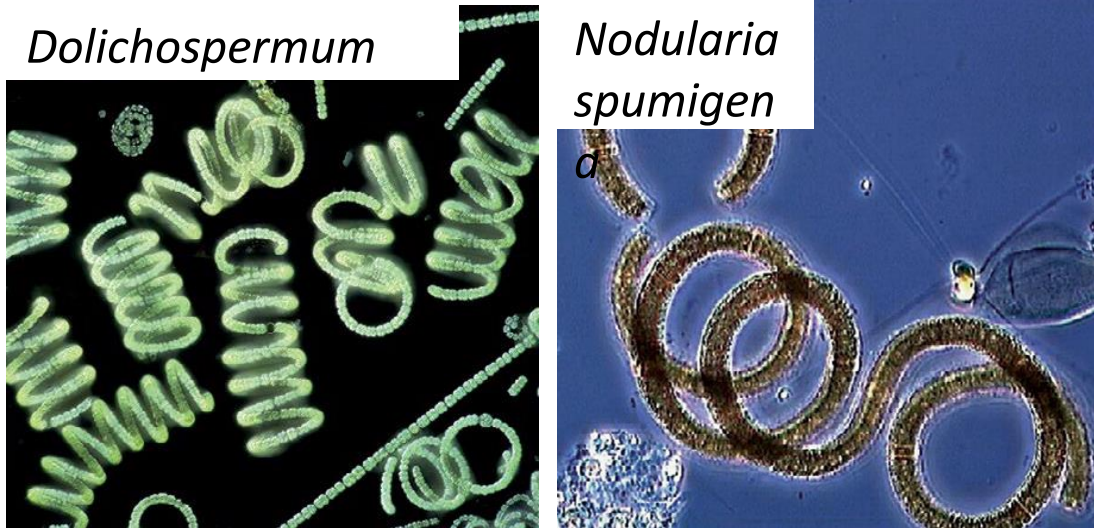
2003 г.



Chl, мг/м³

Южный регион

Цветение цианобактерий в Балтийском море



- содержат токсины
- их разложение снижает количество кислорода
- снижаются привлекательность отдыха
- увеличивают мутность

Vazyulya S. et al. Regional Algorithm of Quantitative Assessment of Cyanobacteria Blooms in the Eastern Part of the Gulf of Finland Using Satellite Ocean Color Data. Journal of Marine Science and Engineering. **2023** Sep 5;11(9):1746.

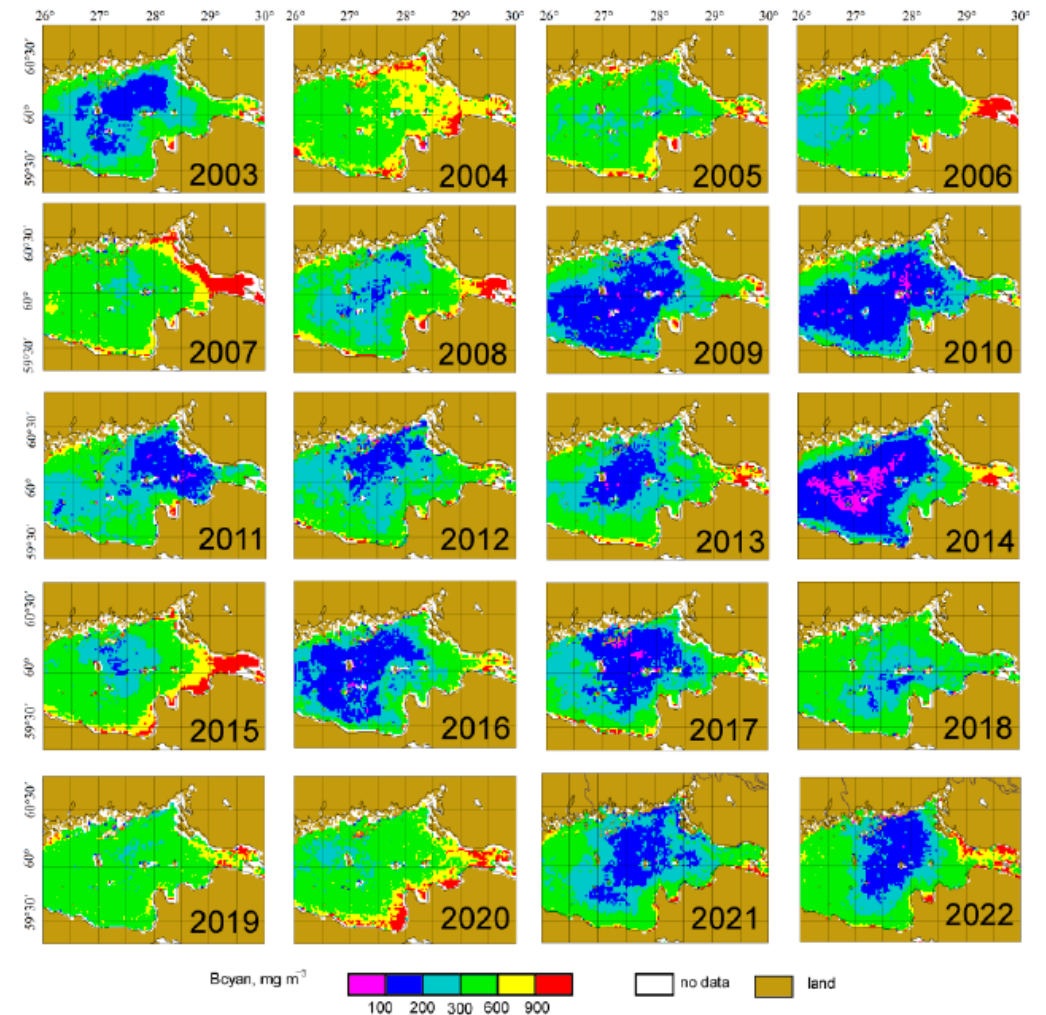


Figure 9. Mean distributions of Bcyan for bloom season (July–August) in the eastern part of the Gulf of Finland in 2003–2022.

Карское море. Примеры распределений в 2025 г.

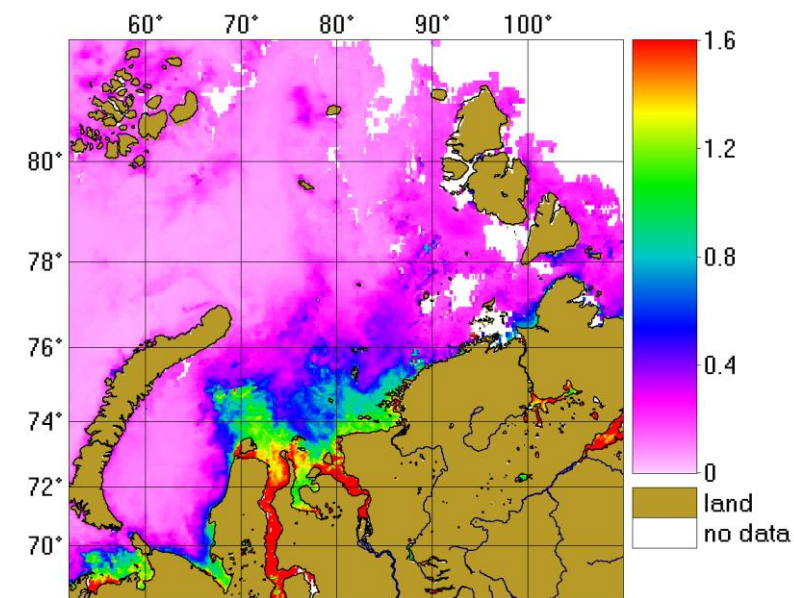
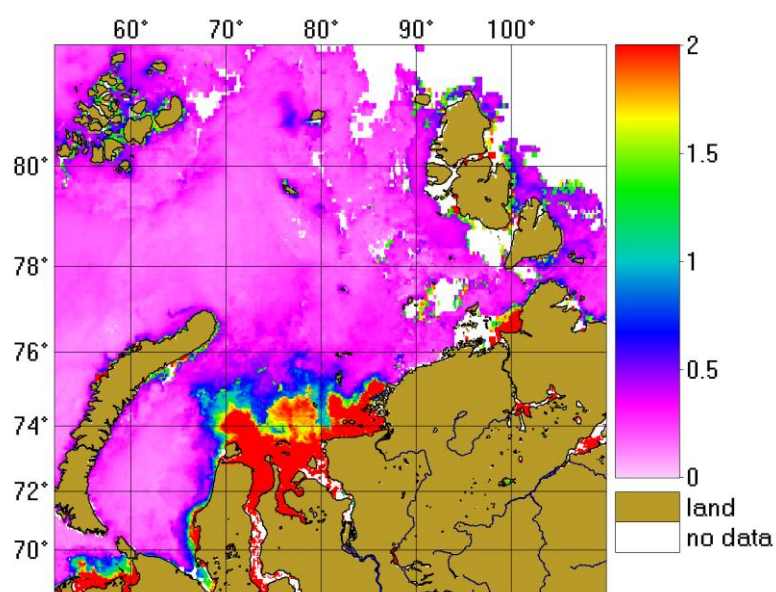
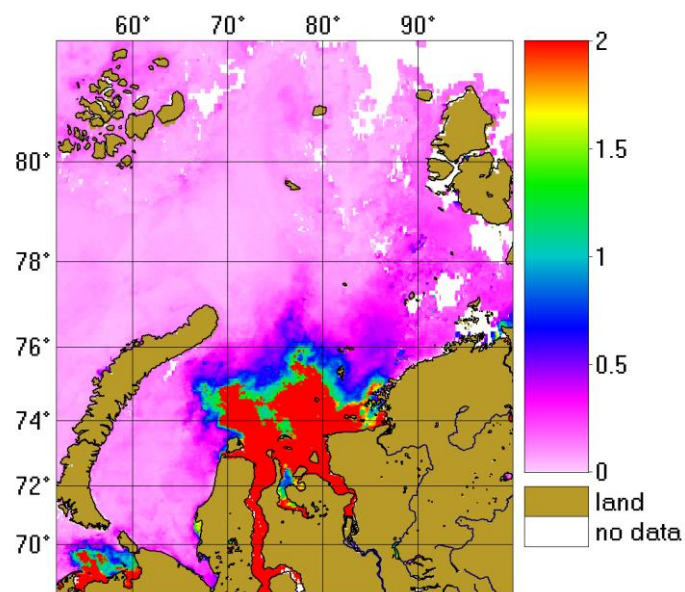
21

$a_g(443)$, 1/м

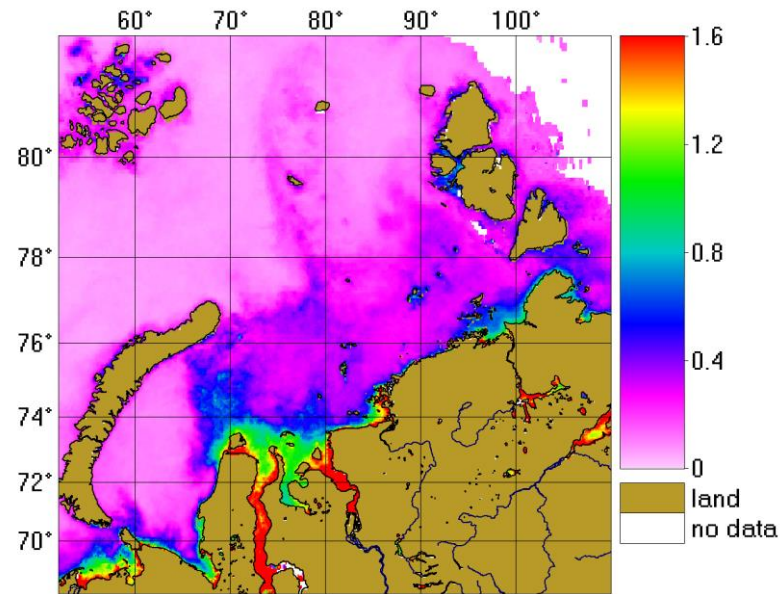
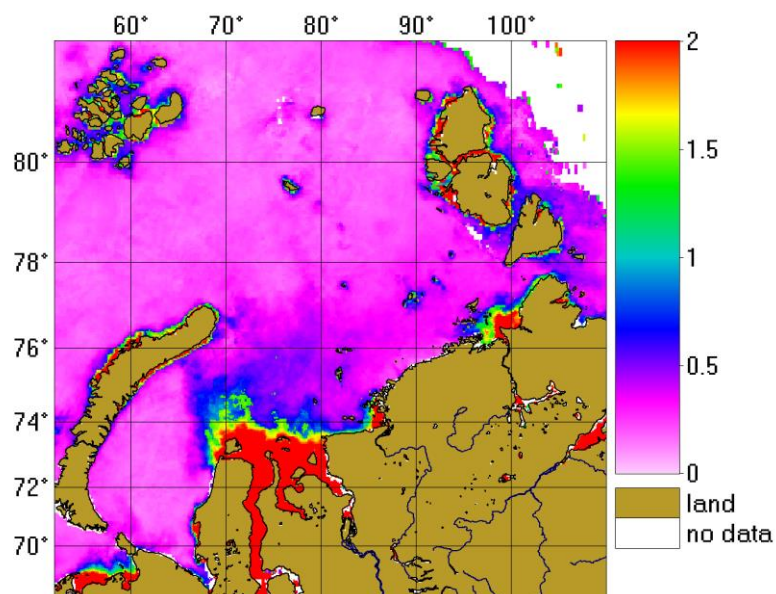
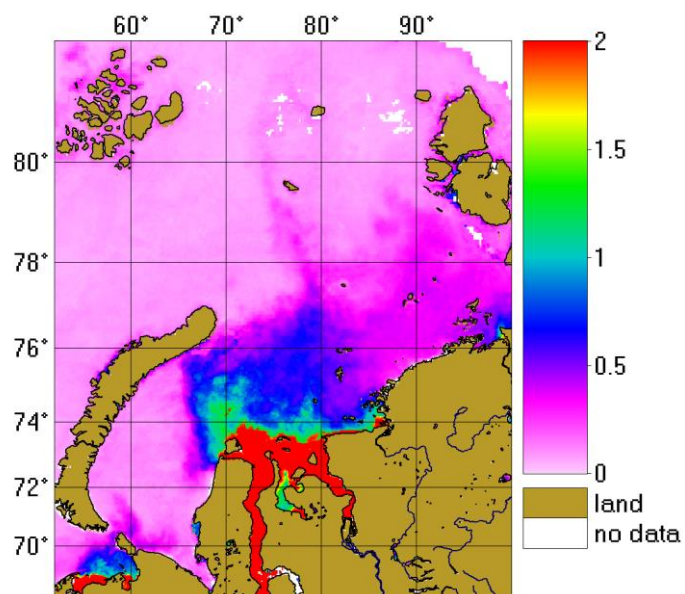
TSM , мг/л

Chl , мг/м³

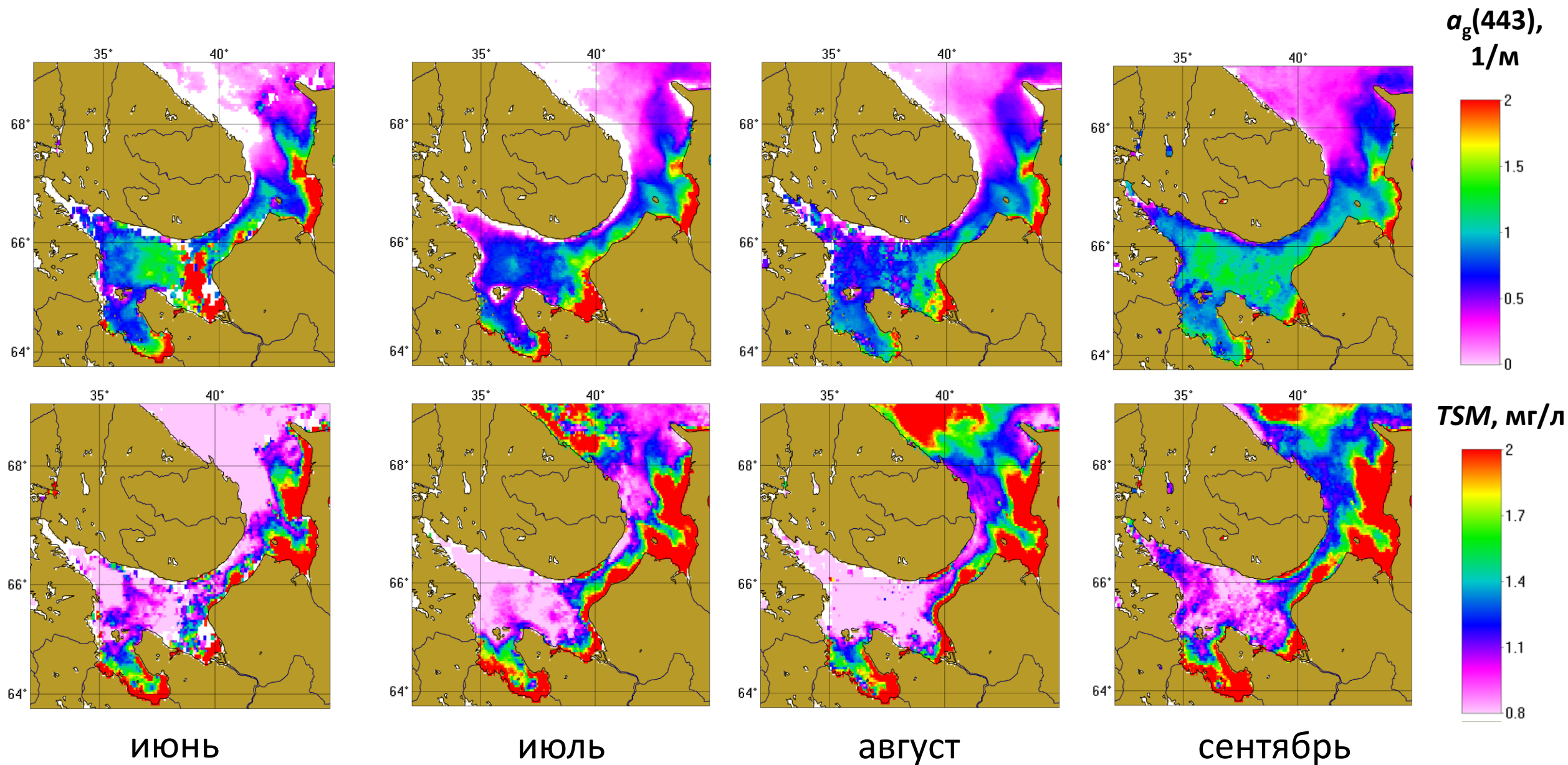
Июль



АВГУСТ

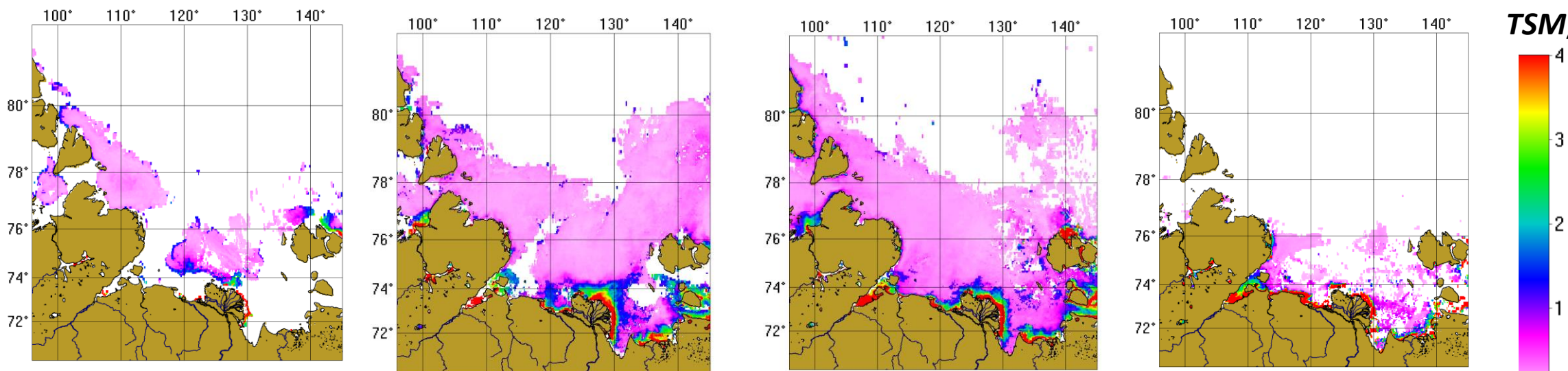
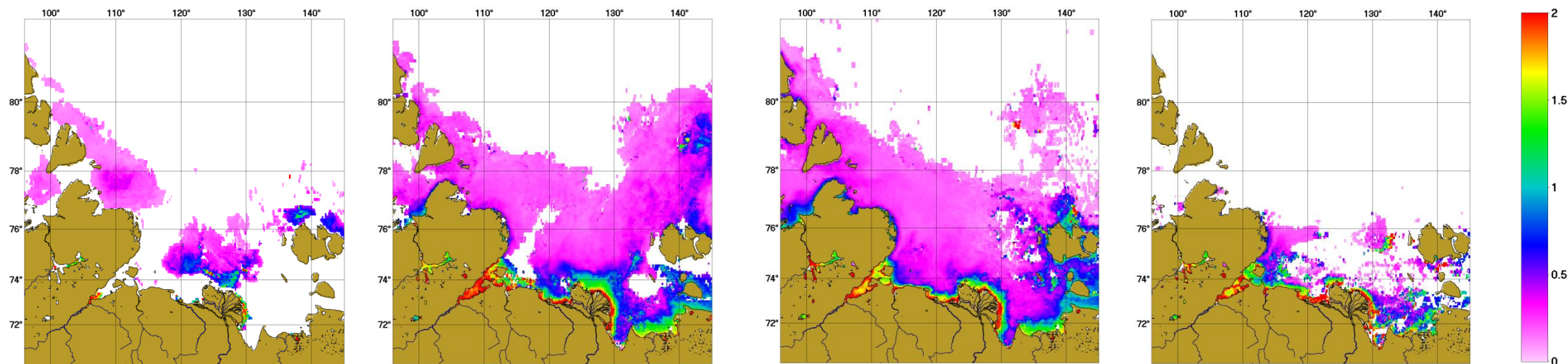


Белое море. Примеры распределений в 2025 г.



Море Лаптевых. Примеры распределений в 2025 г.

Chl, мг/м³



ИЮНЬ

ИЮЛЬ

август

сентябрь



Тренды биооптических характеристик

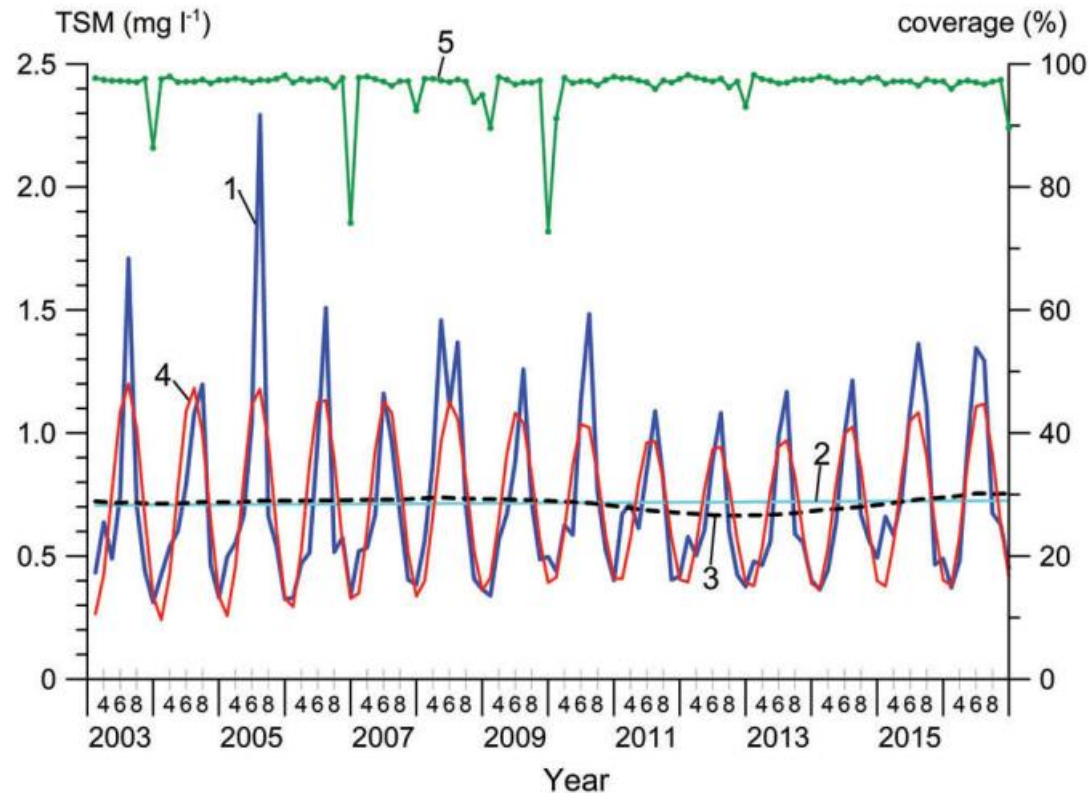
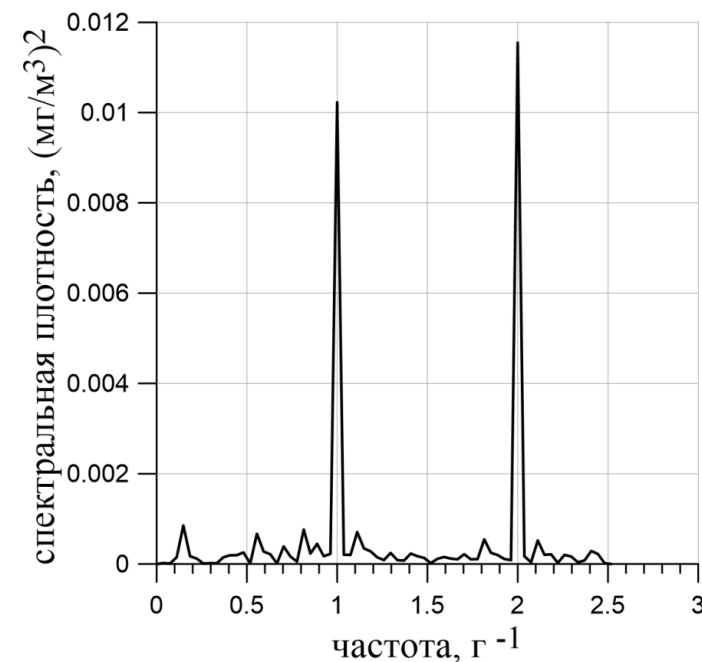
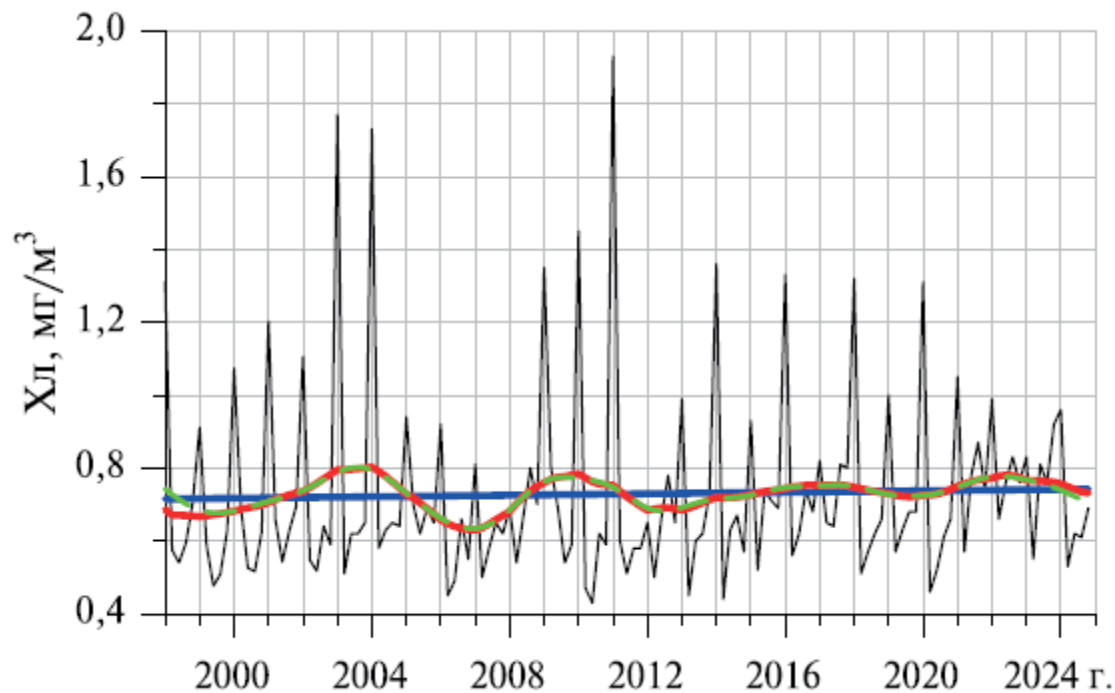


Figure 11. Interannual variations of TSM concentration (mg l^{-1}) from MODIS-Aqua imagery. (1) variations of monthly mean TSM; (2) evaluation of a linear trend; (3) evaluation of a trend by means of a singular spectral analysis; (4) periodical component; (5) percentage of monthly coverage of the study area by satellite data.

Tatiana Bukanova, Oleg Kopelevich, Svetlana Vazyulya, Ekaterina Bubnova & Inna Sahling (2018): Suspended matter distribution in the south-eastern Baltic Sea from satellite and *in situ* data, International Journal of Remote Sensing, DOI: 10.1080/01431161.2018.1519290

Тренды биооптических характеристик

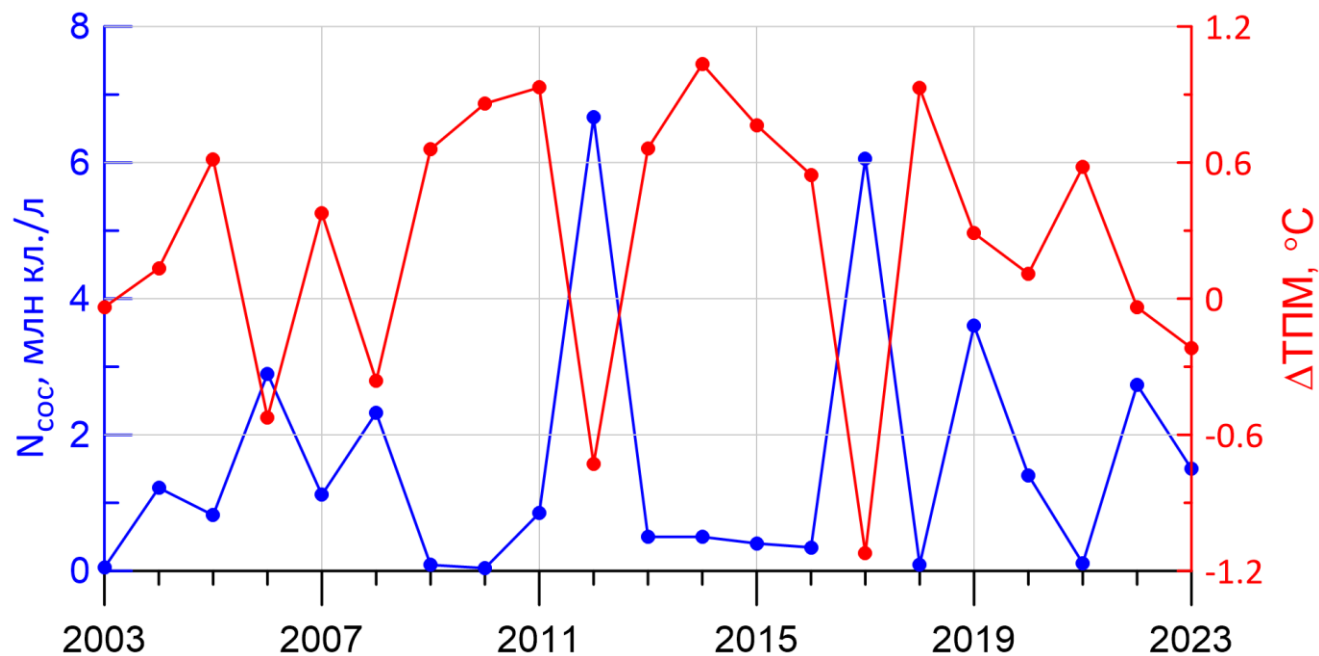
Глуховец Д.И., Салинг И.В., Вазюля С.В., Шеберстов С.В. Межгодовая изменчивость биооптических характеристик Баренцева и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. **2025**. Т. 22. № 2.. С. 244–255



Временной ряд концентрации хлорофилла в среднем регионе Баренцева моря, красными и синими линиями показаны тренды (слева), соответствующая периодограмма (справа)

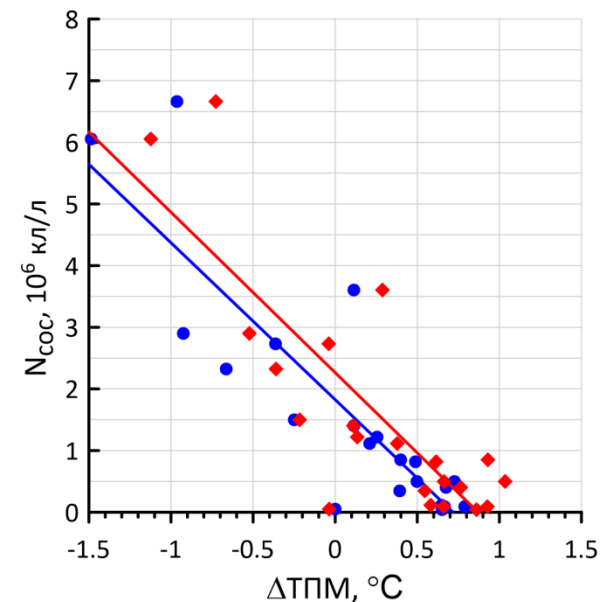
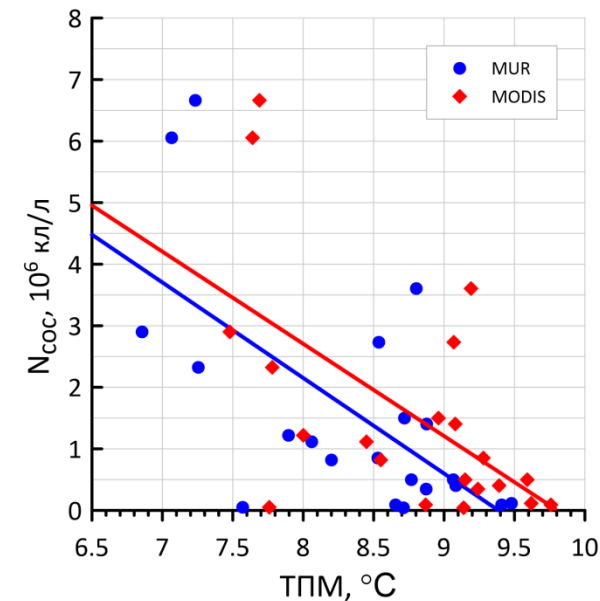
Прогноз кокколитофоридного цветения в Черном море

27



Межгодовые вариации концентрации кокколитофорид N_{coc} в июне и величины $\Delta\text{ТПМ}$ MODIS в феврале в поверхностном слое глубоководной восточной части Черного моря.

Связь величин N_{coc} в июне с ТПМ (слева) и $\Delta\text{ТПМ}$ (справа) в феврале в глубоководной восточной части Черного моря. Сплошными линиями показаны линейные регрессии, синим цветом по данным MUR, красным – MODIS.



<https://optics.ocean.ru>



Спасибо за внимание!



vasyulya.sv@ocean.ru