



Многолетняя изменчивость биооптических характеристик российских морей по данным спутниковых сканеров цвета

Глуховец Д.И., Семилетова Д.Д.
glukhovets@ocean.ru

11 ноября 2025 г.

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)**»

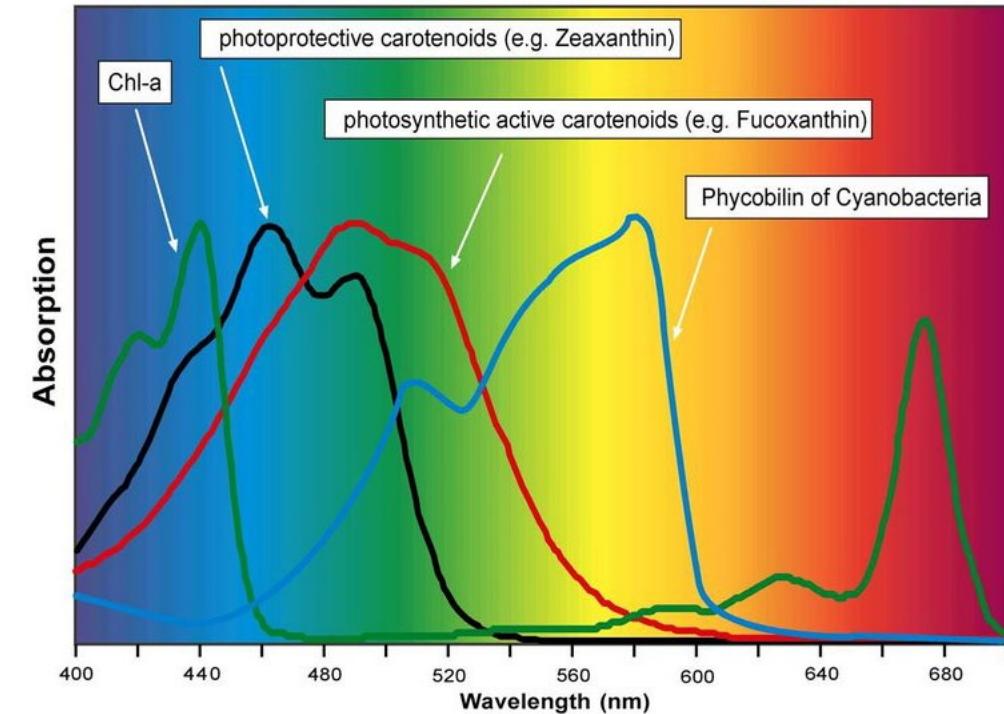
О.В. Копелевич и др., 2018

Измеряются в рейсах:

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

Пигменты фитопланктона

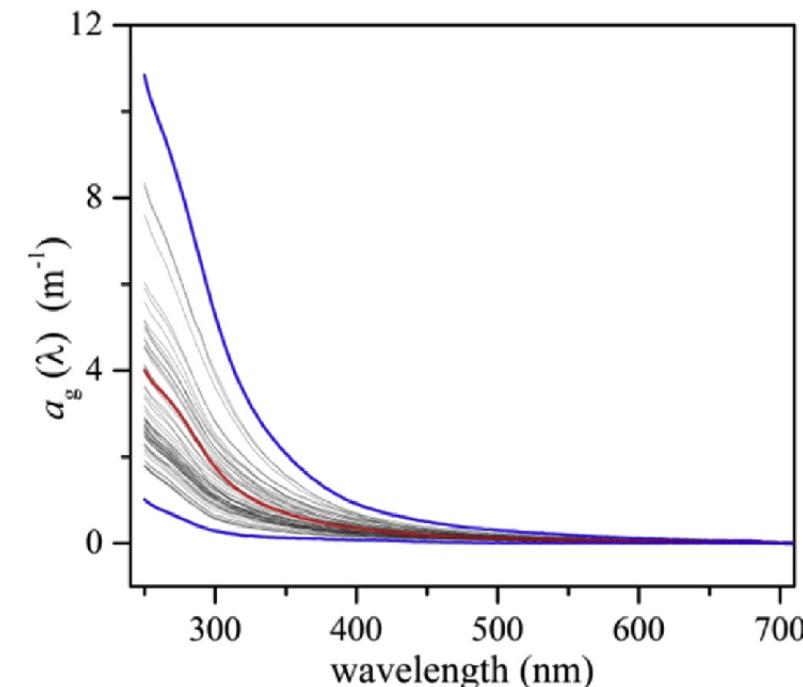
Концентрация хлорофилла – важнейший параметр, характеризующий биомассу фитопланктона и использующийся для расчета первичной продукции океанов и морей, единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных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



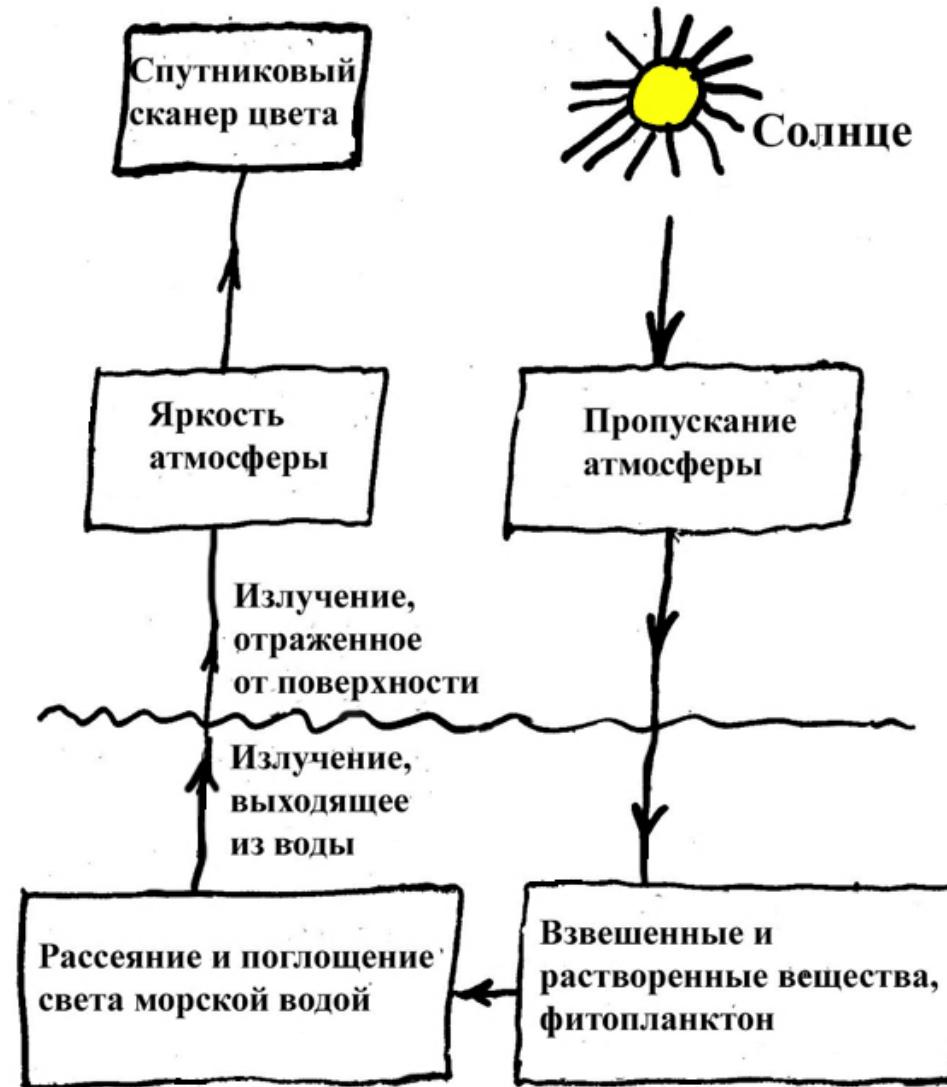
Окрашенное растворенное органическое вещество

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.



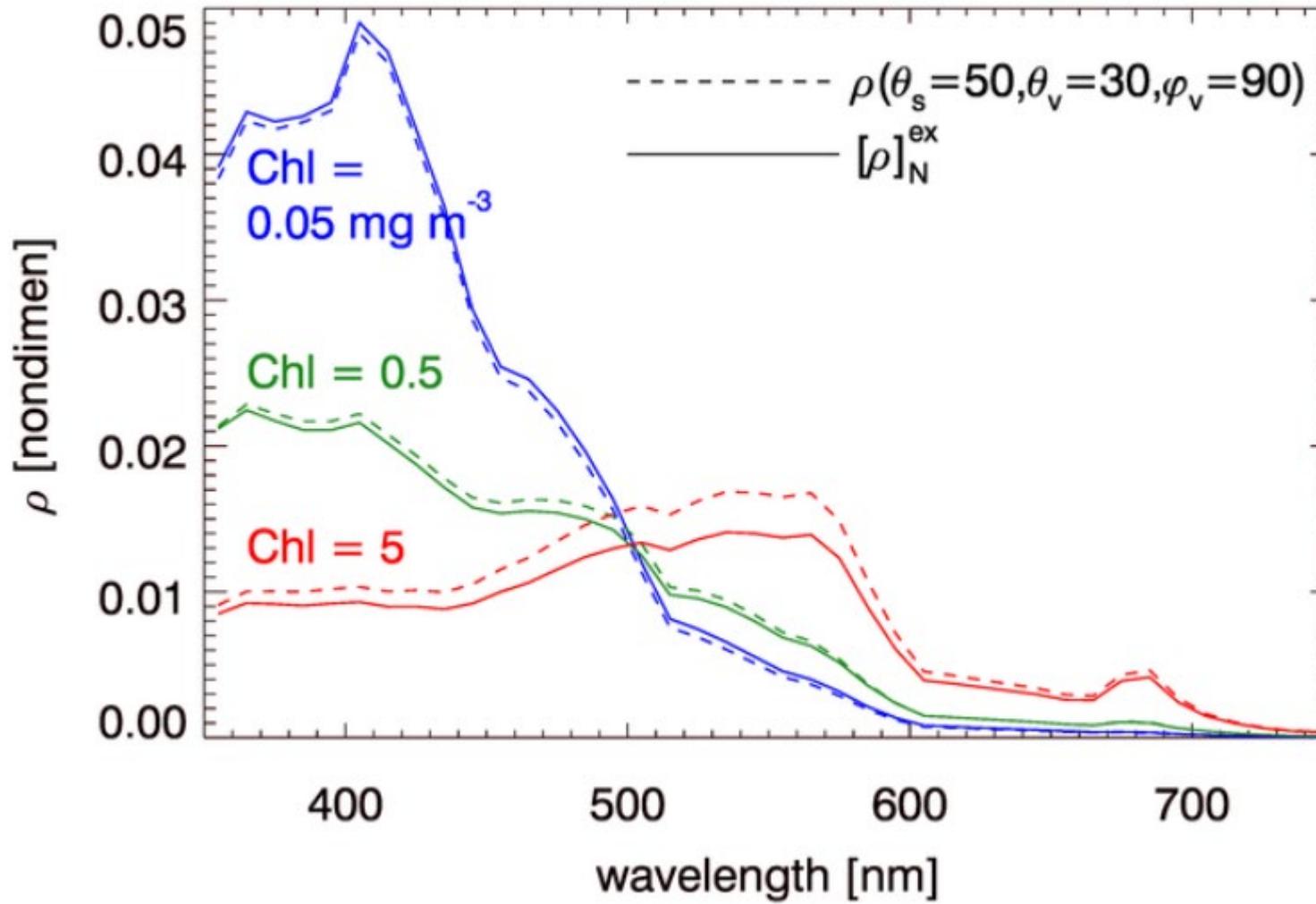
Факторы, формирующие спектральную яркость восходящего излучения, измеряемую спутниковым датчиком цвета



Биооптические параметры

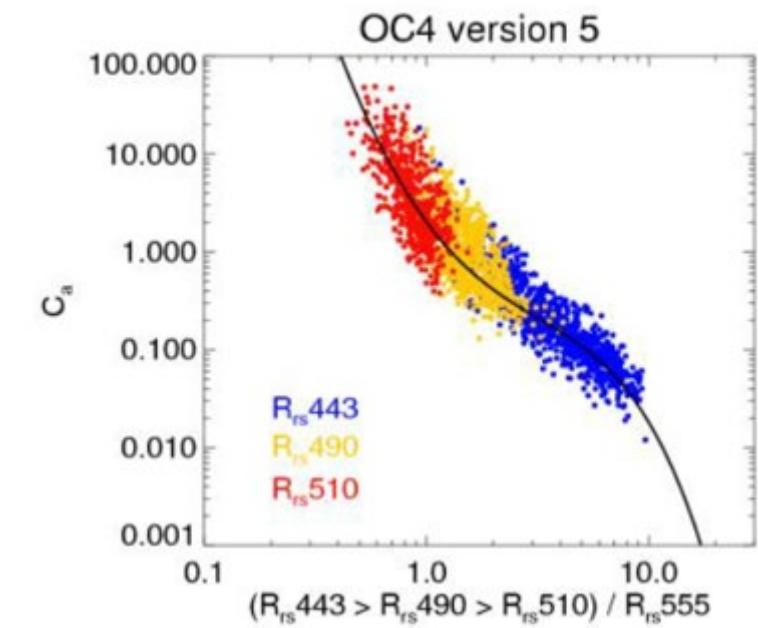
Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости моря R_{rs}	Характеризует пространственно-временную изменчивость свойств поверхностного слоя; входной параметр для всех остальных биооптических алгоритмов
Концентрация хлорофилла Хл	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевая характеристика для 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

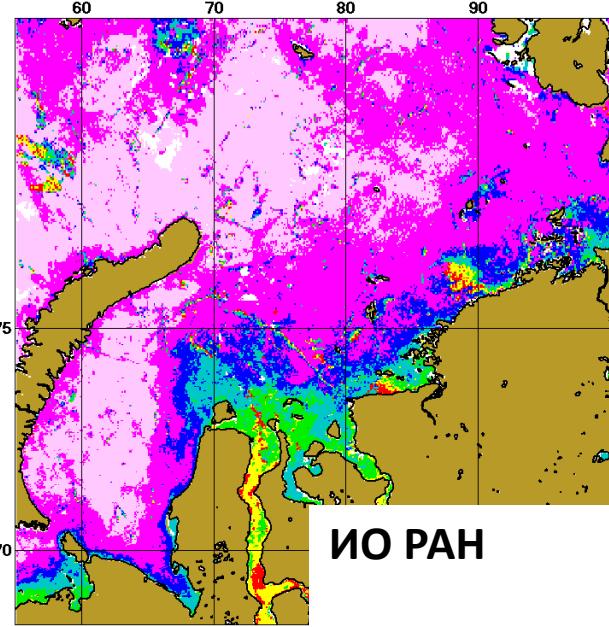


$$R = \frac{\rho(\lambda_{blue})}{\rho(\lambda_{green})}$$

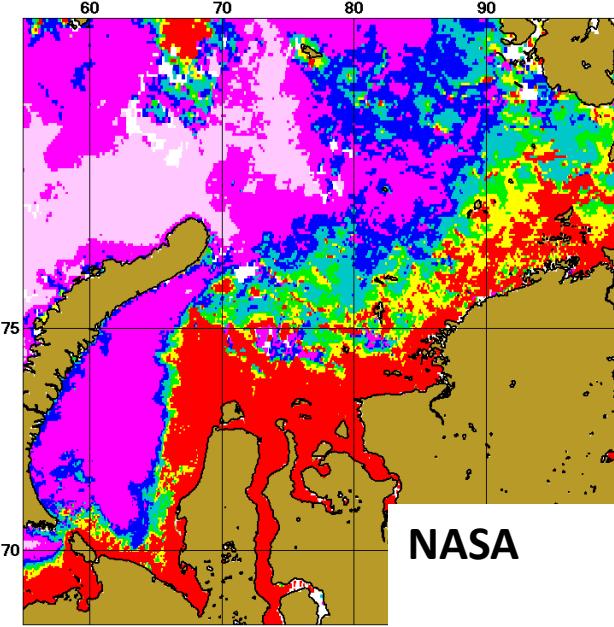
$$\log_{10}(chl) = \sum_{i=0}^4 c_i (\log_{10} R_{max})^i$$



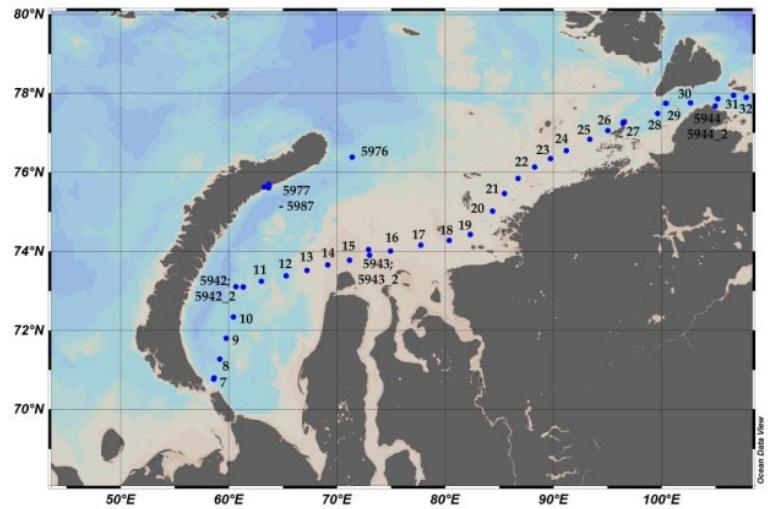
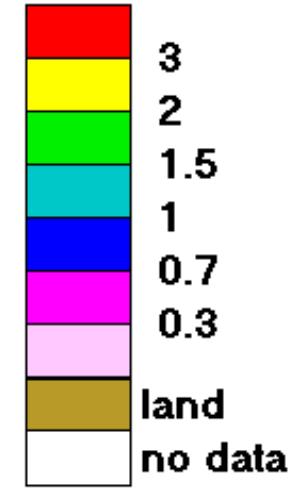
Необходимость разработки региональных алгоритмов



ИО РАН



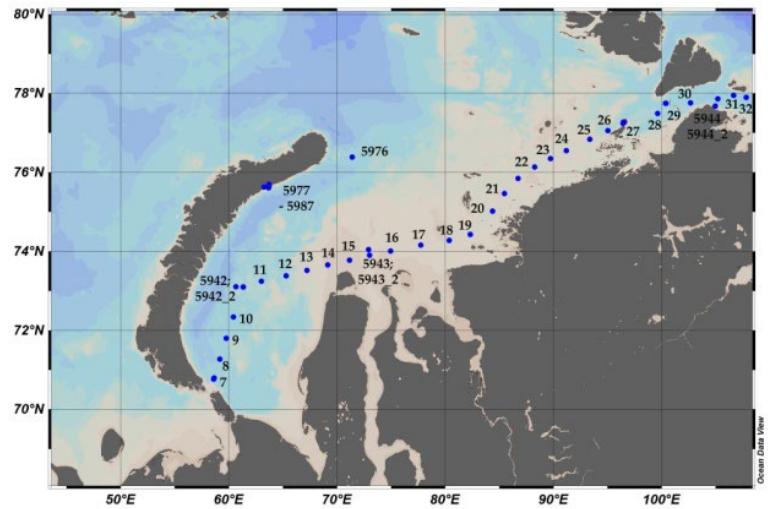
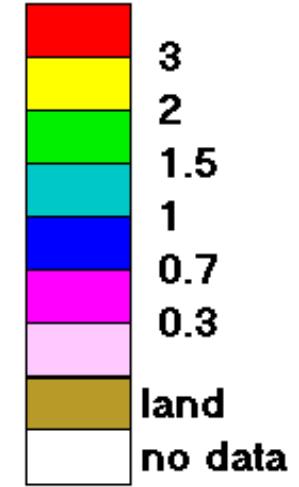
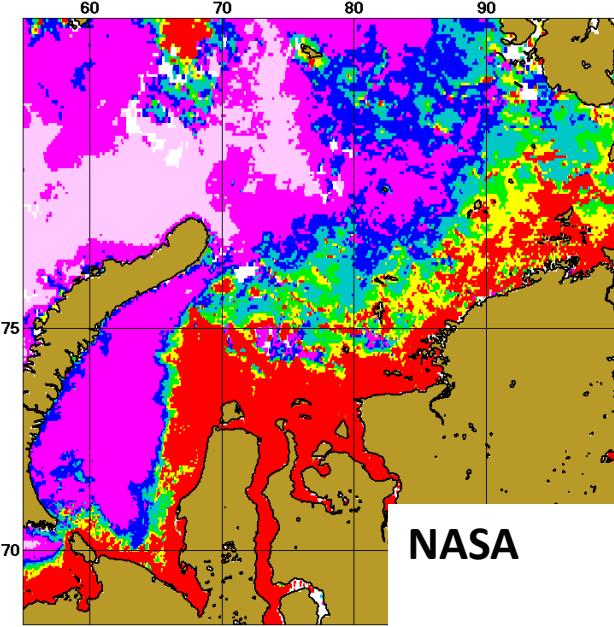
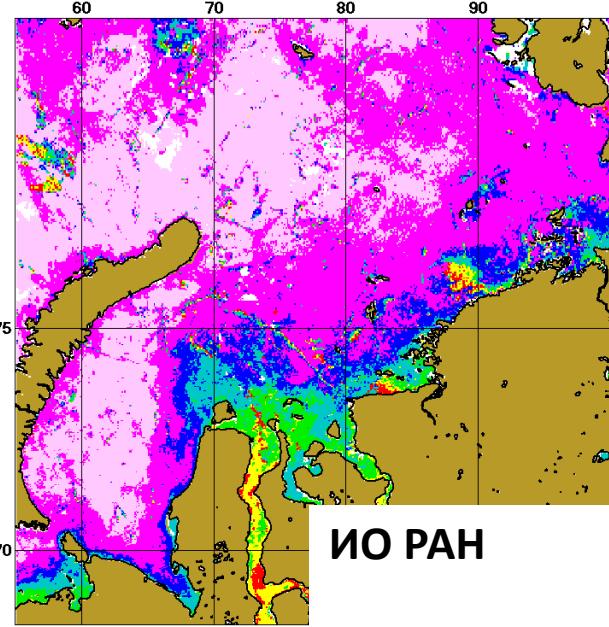
NASA



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.

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

Экспедиционные исследования



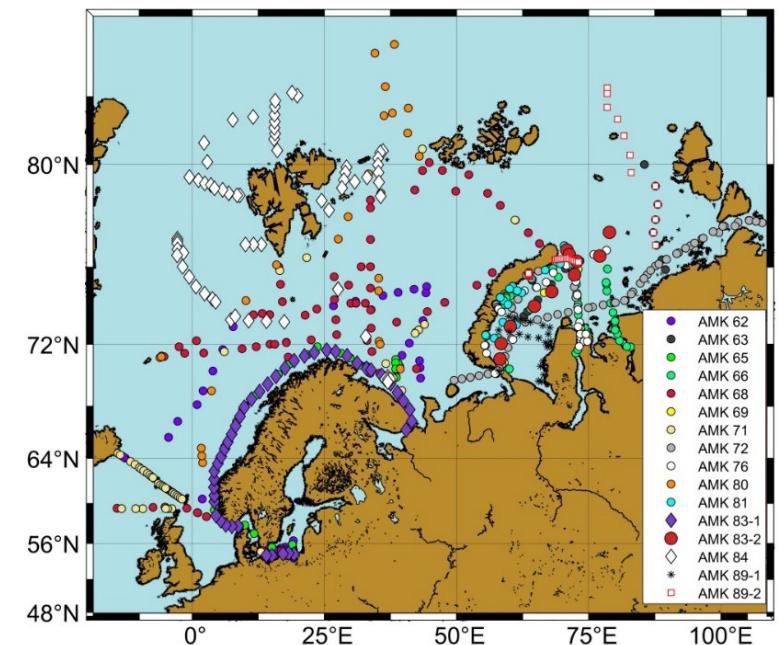
Работа на станциях

- Зондирования
- Измерения коэффициента яркости моря
- Отбор проб

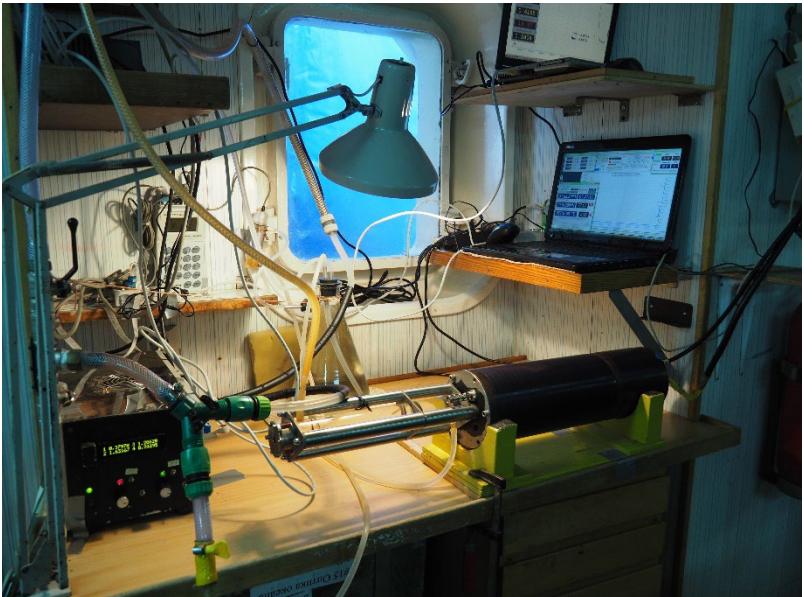
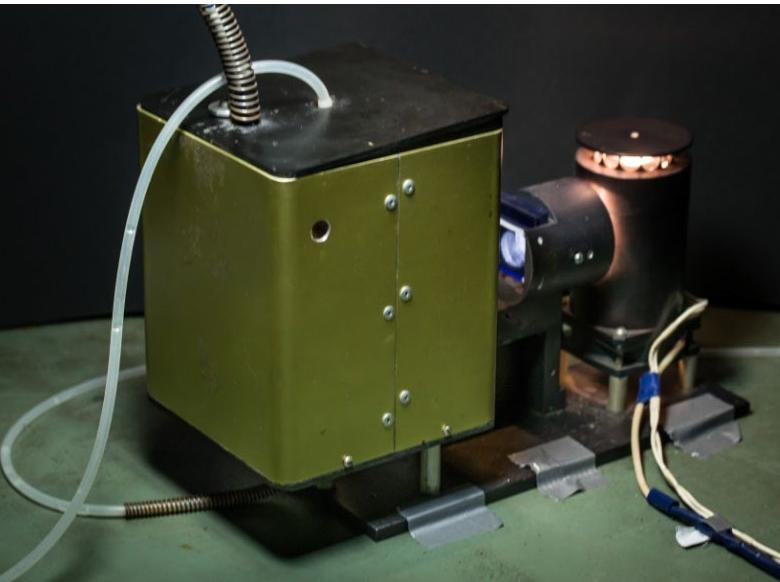
Непрерывные измерения на ходу судна

- Проточный комплекс
- Световые поля

Карта станций 2015-2022 гг.



Данные судовых измерений



Региональные алгоритмы, разработанные в ЛОО ИО РАН

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

<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. Карапли, А.В. Юшманова



Москва, 2018

Атлас биооптических характеристик российских морей по данным спутниковых сканеров цвета

Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И.

email: atlas@ocean.ru

Atlas of Bio-optical Characteristics of the Russian Seas According to Satellite Ocean Color Scanners

Sahling I.V., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Burenkov V.I.

[Баренцево море \(Barents Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

[Карское море \(Kara Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

[Море Лаптевых \(Laptev Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

[Белое море \(White Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

[Балтийское море \(Baltic Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

[Черное море \(Black Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

[Каспийское море \(Caspian Sea\)](#) [Maps](#) [Tables](#)

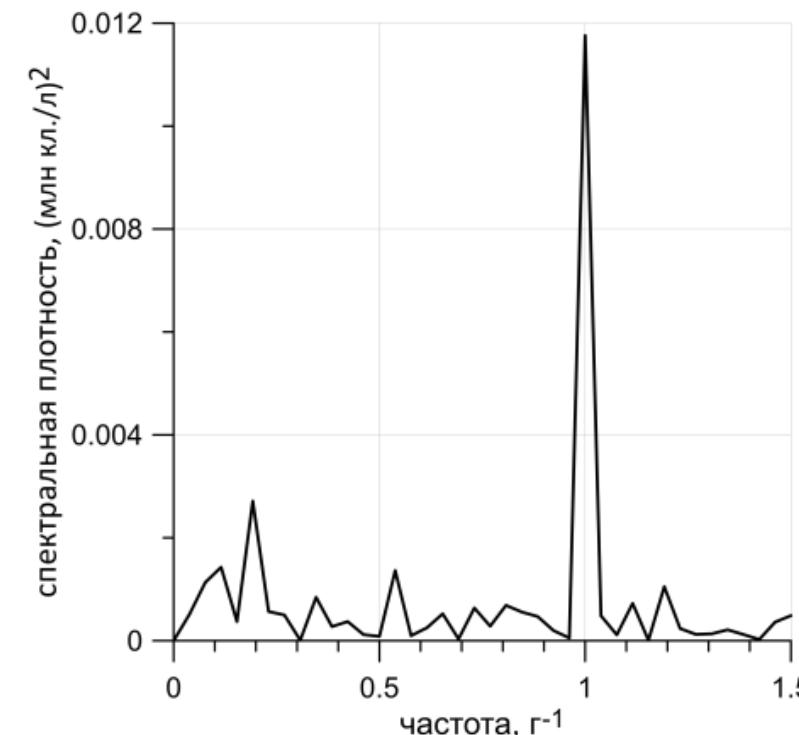
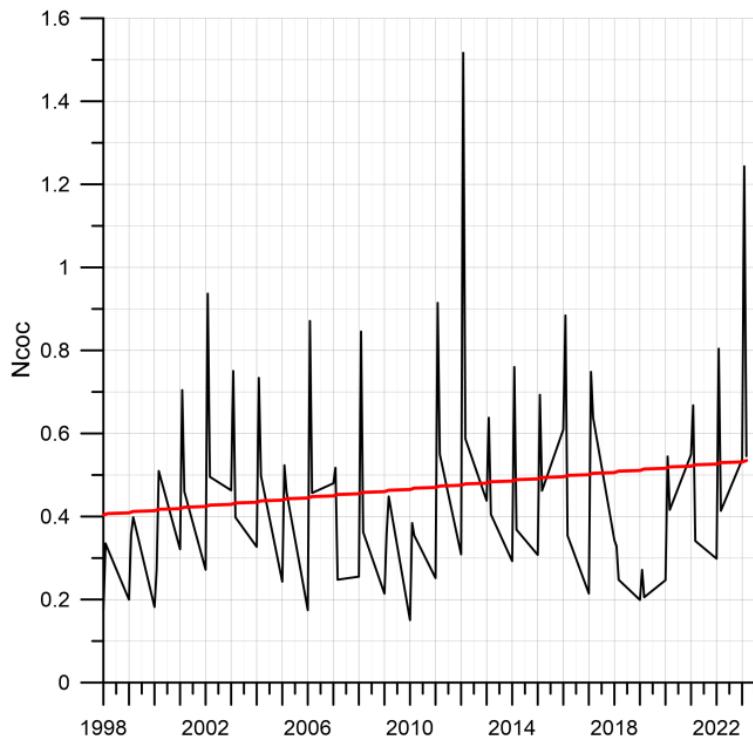
Тренды среднемесячных значений биооптических характеристик

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.

(Глуховец и др., 2025)

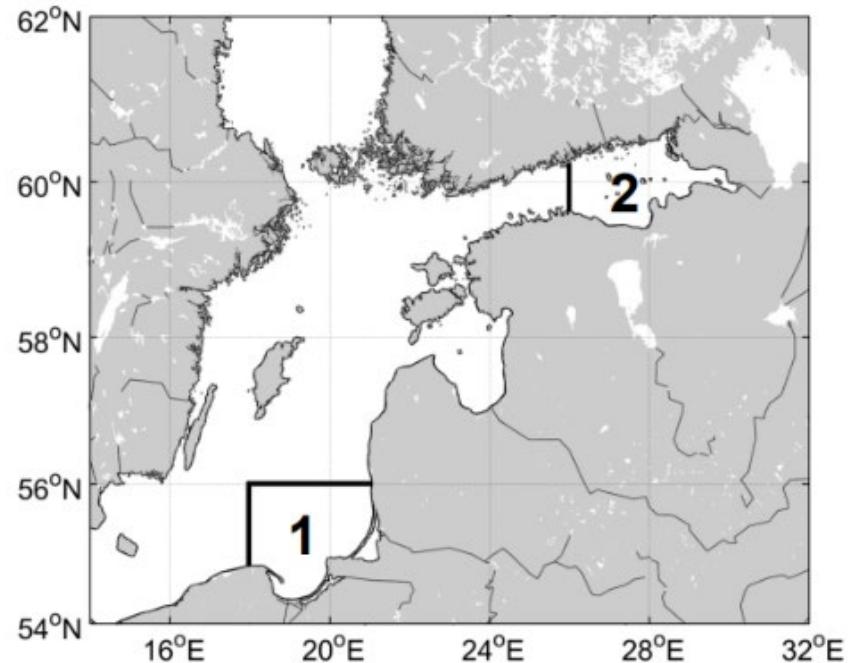


Временной ряд концентрации кокколитофорид в области цветения в Баренцевом море, красной линией показан тренд (слева), соответствующая периодограмма (справа), 1998 – 2023 гг.

Балтийское море

Регион	Chl (мг/м3)	Chlor_a (мг/м3)	TSM (мг/л)	SST (°C)
Балтийское море				
Финский залив	0,0255 ±0,0203	-0,0091 ±0,0952	0,0121 ±0,0140	0,0579 ±0,0348
ЮВ Балтика	0,0058 ±0,0176	-0,0337 ±0,0461	-0,0032 ±0,0059	0,0607 ±0,0293

2002-2024 гг., MODIS-Aqua

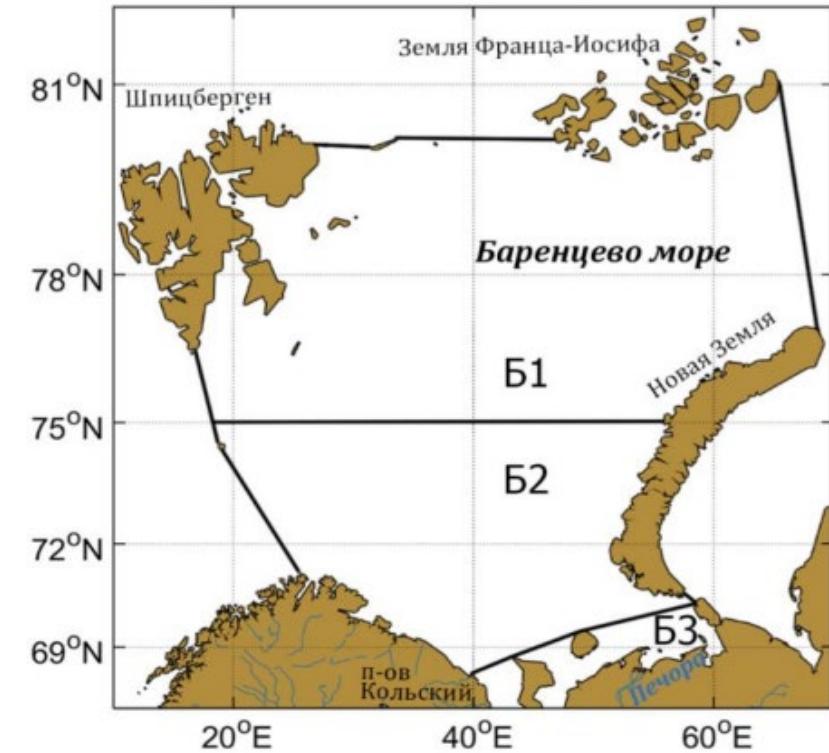


Субрегионы Балтийского моря:
1 – Юго-Восточная Балтика,
2 – восточная часть Финского залива.

Баренцево море

Регион	Chl (мг/м3)	Chlor_a (мг/м3)	TSM (мг/л)	ag (м-1)	SST (°C)
Баренцево море					
Северный	0,0015 ±0,0051	0,0006 ±0,0131	-0,0006 ±0,0019	0 ±0,0008	0,0545 ±0,0205
Средний	0,0007 ±0,0050	-0,007 ±0,0177	-0,0015 ±0,0047	0,0001 ±0,0009	0,0631 ±0,0263
Южный	0,0014 ±0,0041	0,0145 ±0,0194	-0,0054 ±0,0044	-0,0023 ±0,0034	0,0731 ±0,375

2002-2024 гг., MODIS-Aqua

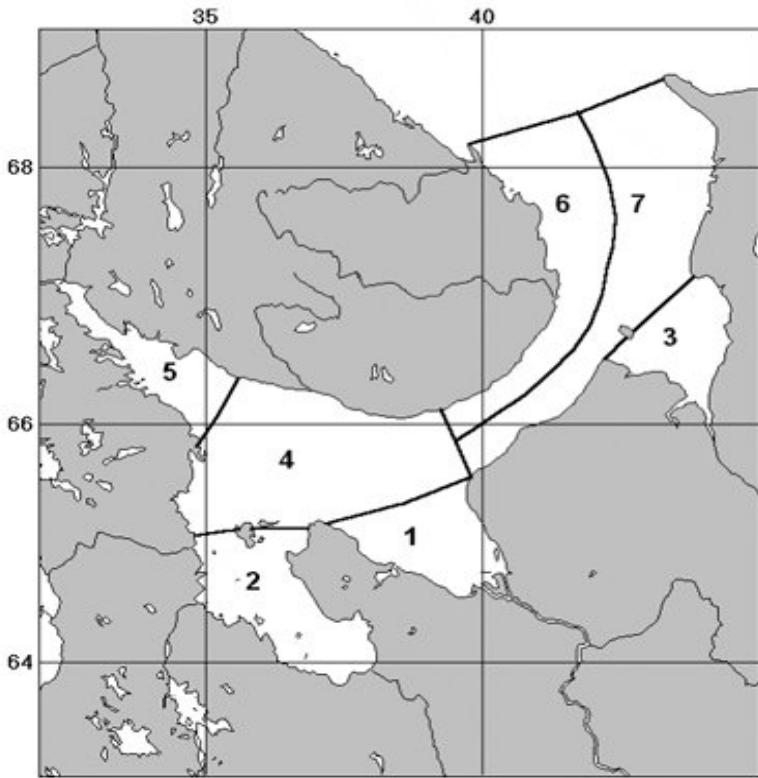


Субрегионы в Баренцевом море:
 Б1 - Северный субрегион,
 Б2 - Средний субрегион,
 Б3 - Южный субрегион

Белое море

Регион	Chl (мг/м3)	Chlor_a (мг/м3)	TSM (мг/л)	ag (м-1)	SST (°C)
Белое море					
Двинский залив	-0,0041 ±0,0035	-0,1376 ±0,0862	-0,0050 ±0,0049	-0,0153 ±0,0126	0,0578 ±0,0457
Онежский залив	-0,0020 ±0,0025	-0,0156 ±0,0825	-0,0145 ±0,0070	-0,0005 ±0,0068	0,0417 ±0,0286
Мезенский залив	-0,004 ±0,0022	0,0642 ±0,0634	-0,0133 ±0,0072	-0,0012 ±0,0095	0,0598 ±0,0289
Центральный бассейн	-0,0023 ±0,0022	-0,0805 ±0,0431	-0,0024 ±0,0020	-0,0045 ±0,0037	0,0625 ±0,0355
Кандалакшский залив	-0,0031 ±0,0038	-0,0756 ±0,0606	-0,0014 ±0,0028	-0,0038 ±0,0035	0,0660 ±0,0425
Северо-западный субрегион	-0,0015 ±0,0022	-0,0125 ±0,0391	-0,0063 ±0,0036	-0,0009 ±0,0019	0,0401 ±0,0177
Северо-восточный субрегион	0 ±0,0019	0,0148 ±0,0425	-0,0106 ±0,0051	0 ±0,0033	0,0526 ±0,0228

2002-2024 гг., MODIS-Aqua



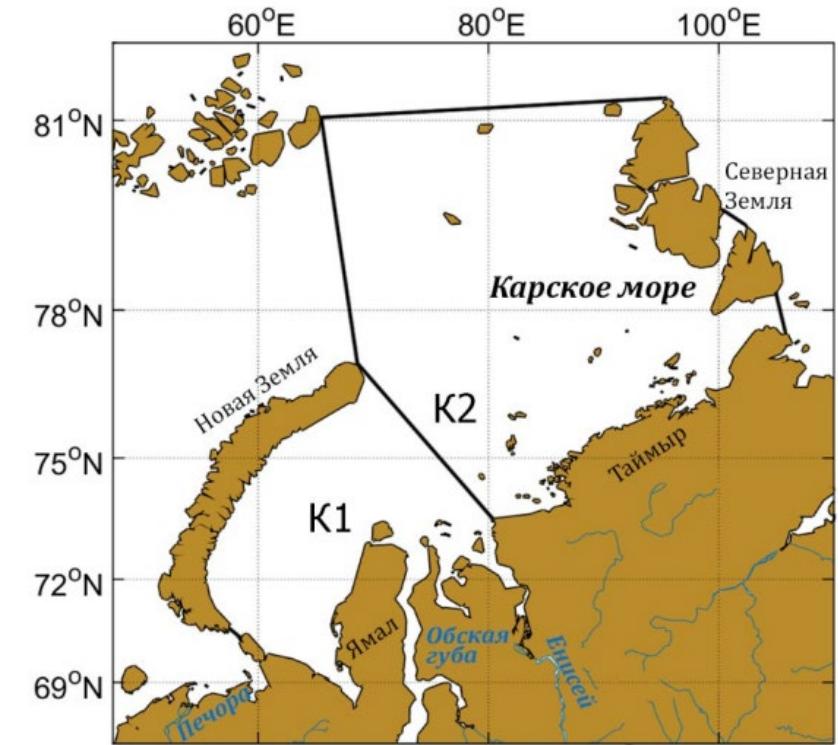
Субрегионы в Белом море:

- Б1 – Двинский залив,
- Б2 – Онежский залив,
- Б3 – Мезенский залив,
- Б4 – Центральный субрегион,
- Б5 – Кандалакшский залив,
- Б6 – Северо-западный субрегион,
- Б7 – Северо-восточный субрегион

Карское море

Регион	Chl (мг/м3)	Chlor_a (мг/м3)	TSM (мг/л)	ag (м-1)	SST (°C)
Карское море					
Юго-западный	0,0025 ±0,0031	-0,0090 ±0,0304	0,0009 ±0,0081	-0,0006 ±0,0061	0,0964 ±0,0404
Северо-восточный	-0,0023 ±0,0036	-0,0521 ±0,0380	-0,0100 ±0,0066	-0,0072 ±0,0054	0,00570 ±0,0294

2002-2024 гг., MODIS-Aqua

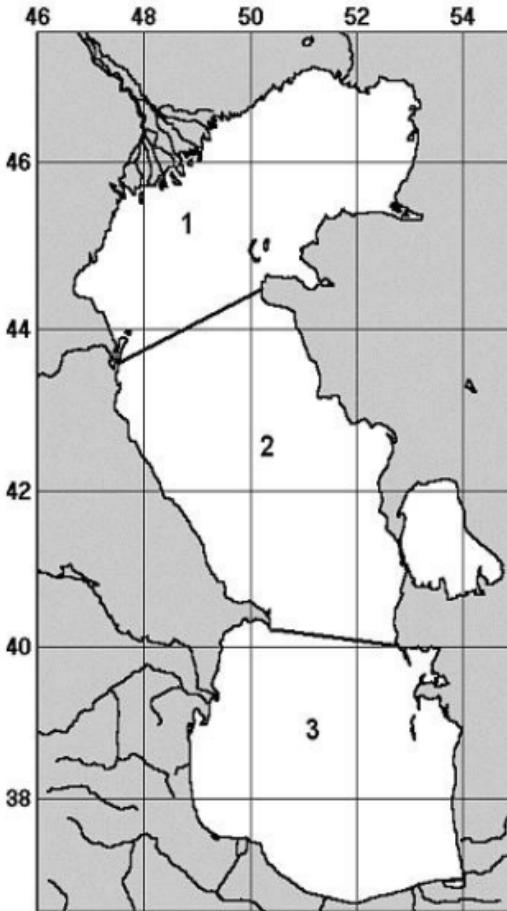


Субрегионы Карского моря:
 K1 – юго-западный,
 K2 – северо-восточный

Каспийское море

Регион	Chl (мг/м3)	Chlor_a (мг/м3)	TSM (мг/л)	ag (м-1)	SST (°C)
Каспийское море					
Северный	0,0165 ±0,0038	0,0729 ±0,0210	0,0965 ±0,0108	-0,0028 ±0,0009	0,0442 ±0,0223
Средний	-0,0030 ±0,0025	-0,0215 ±0,0150	0,0034 ±0,0016	-0,0028 ±0,0010	0,0293 ±0,0170
Южный	-0,0117 ±0,0023	-0,0602 ±0,0134	-0,0023 ±0,0023	-0,0040 ±0,0007	0,0400 ±0,0180

2002-2024 гг., MODIS-Aqua

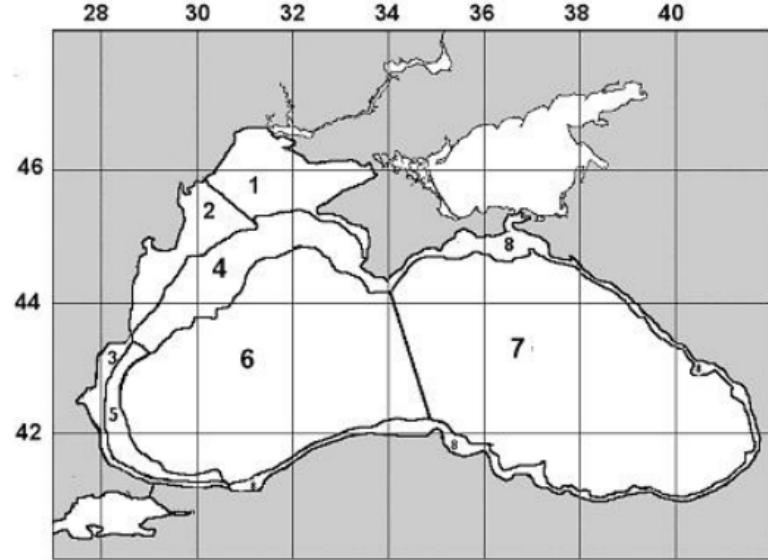


Субрегионы Каспийского моря:

- 1 – Северный Каспий,
- 2 – Средний Каспий,
- 3 – Южный Каспий

Черное море

Регион	Chl (мг/м3)	Chlor_a (мг/м3)	ag (м-1)	SST (°C)
Черное море				
Северный внутренний шельф	-0,0161±0,0046	-0,0057±0,0229	-0,0018±0,0010	0,0720±0,0215
Северо-западный внутренний шельф	-0,0282±0,0086	-0,0790±0,0360	-0,0017±0,0014	0,0759±0,0195
Юго-западный внутренний шельф	-0,0127±0,0079	-0,0379±0,0539	-0,0005±0,0015	0,0919±0,0195
Северо-западный внешний шельф	-0,0054±0,0025	-0,0109±0,0095	-0,003±0,0005	0,0606±0,0167
Юго-западный внешний шельф	-0,0067±0,0046	-0,0193±0,00263	0,0002±0,0007	0,0811±0,0175
Западная открытая часть	0,0014±0,0007	0,0026±0,0034	0,0002±0,0004	0,0725±0,0162
Восточная открытая часть	0,0014±0,0007	0,0011±0,0038	-0,0001±0,0004	0,0684±0,0169
Восточный и южный шельф	0,0026±0,0013	-0,0037±0,0103	-0,0009±0,0005	0,0702±0,0154



- Субрегионы Чёрного моря:
- 1 – северный внутренний шельф,
 - 2 – северо-западный внутренний шельф,
 - 3 – юго-западный внутренний шельф,
 - 4 – северо-западный внешний шельф,
 - 5 – юго-западный внешний шельф,
 - 6 – западная открытая часть,
 - 7 – восточная открытая часть,
 - 8 – восточный и южный шельф

2002-2024 гг., MODIS-Aqua

Заключение

- По данным о среднемесячных значениях биооптических характеристик, полученных с использованием региональных алгоритмов ИО РАН, выполнен расчет трендов их межгодовой изменчивости для субрегионов шести морей: Балтийского, Баренцева, Белого, Карского, Каспийского и Чёрного.
- Во всех субрегионах зафиксирован статистически значимый положительный тренд температуры поверхности моря. Наиболее сильное потепление отмечено в юго-западной части Карского моря ($0,096 \pm 0,04$ °C/год).
- Тренды концентрации хлорофилла а разнонаправлены, однако в большинстве случаев они незначимы по уровню 95 %. Значимый положительный тренд зарегистрирован в северной части Каспийского моря ($0,017 \pm 0,004$ мг/м³), отрицательный – в западной части Чёрного моря.
- Для некоторых акваторий обнаружены расхождения знаков незначимых трендов, рассчитанных по результатам применения стандартного и регионального алгоритмов.
- Наибольший тренд концентрации взвешенного вещества зарегистрирован в северной части Каспийского моря ($0,097 \pm 0,011$ мг/л), ОРОВ – в Двинском заливе Белого моря ($-0,015 \pm 0,013$ м⁻¹).

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.

Обработка спутниковых данных выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России для ИО РАН (тема № FMWE-2024-0015), расчет трендов – за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-10065, <https://rscf.ru/project/25-77-10065>. Грант предоставлен через ИО РАН.