



# Многолетняя изменчивость биооптических характеристик российских морей по данным спутниковых сканеров цвета

Глуховец Д.И., Семилетова Д.Д.  
[glukhovets@ocean.ru](mailto: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)**»

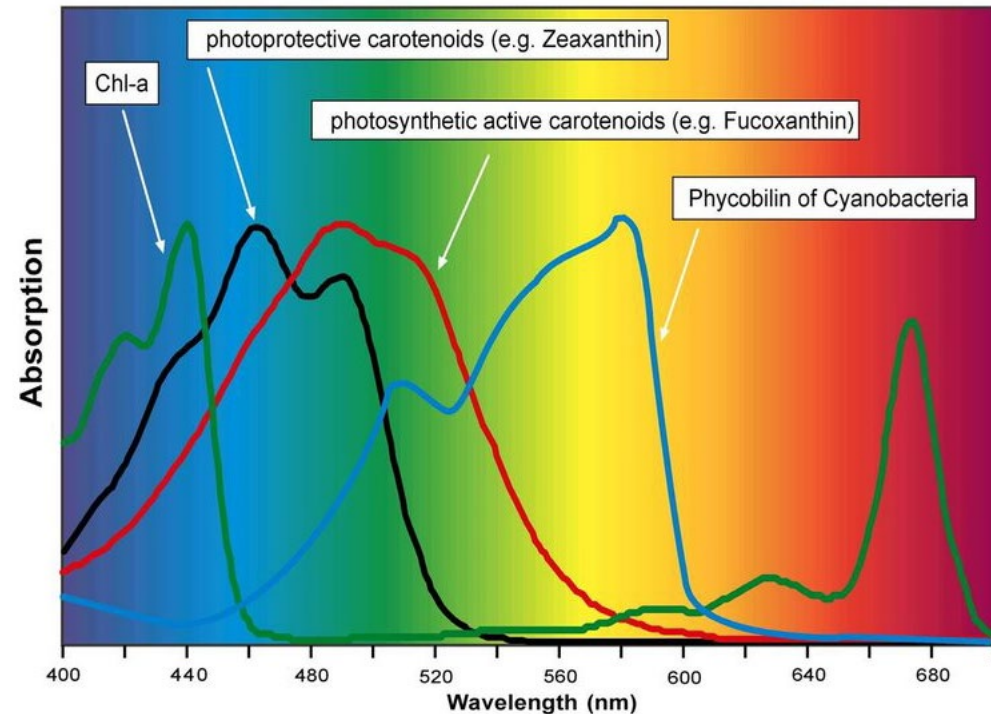
О.В. Копелевич и др., 2018

Измеряются в рейсах:

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

# Пигменты фитопланктона

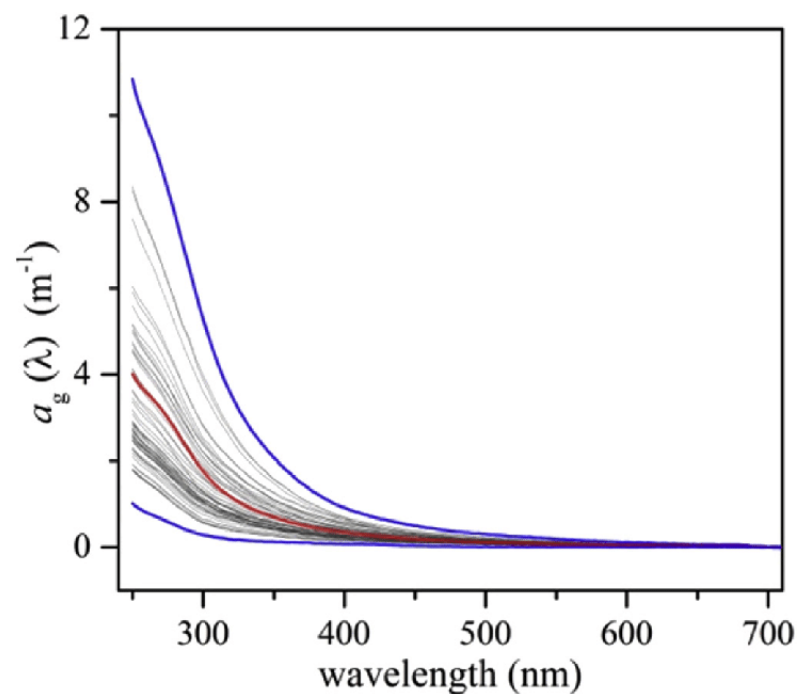
Концентрация хлорофилла – важнейший параметр, характеризующий биомассу фитопланктона и использующийся для расчета первичной продукции океанов и морей, единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространственных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



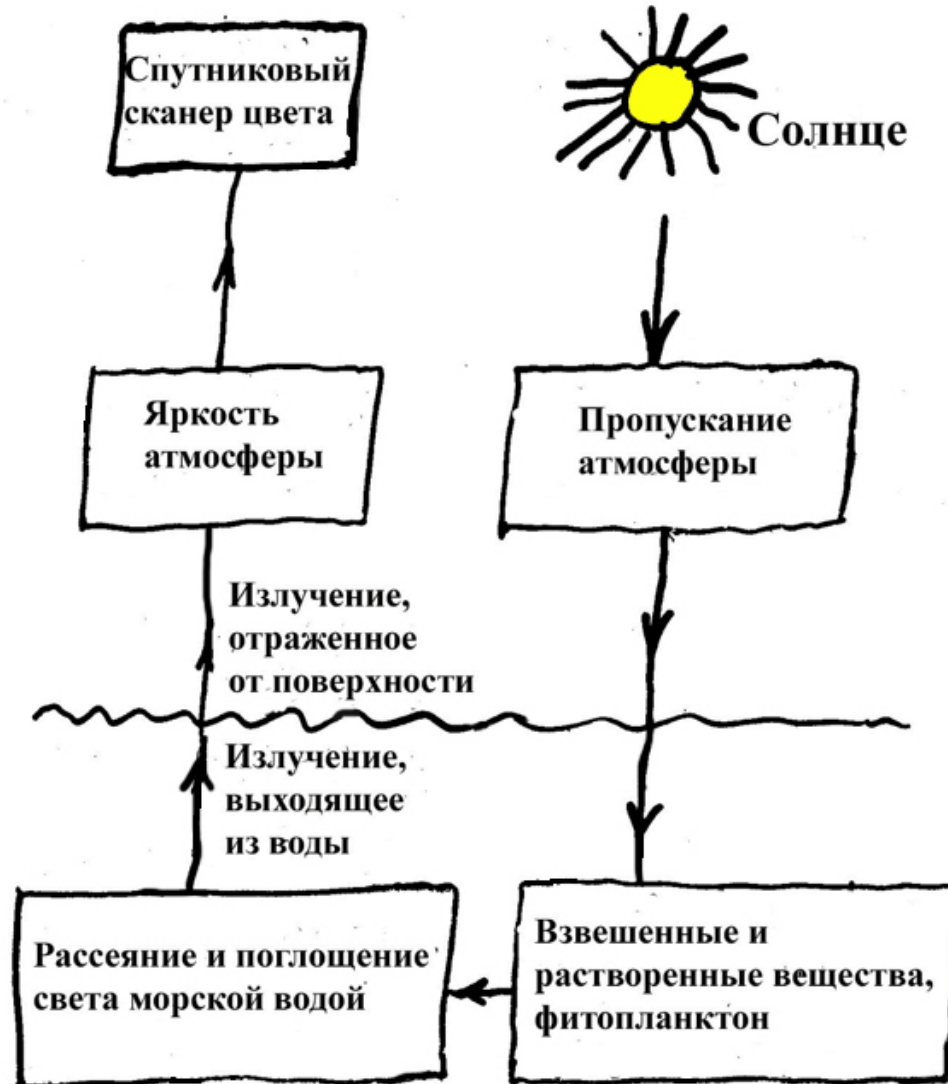
# Окрашенное растворенное органическое вещество

**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

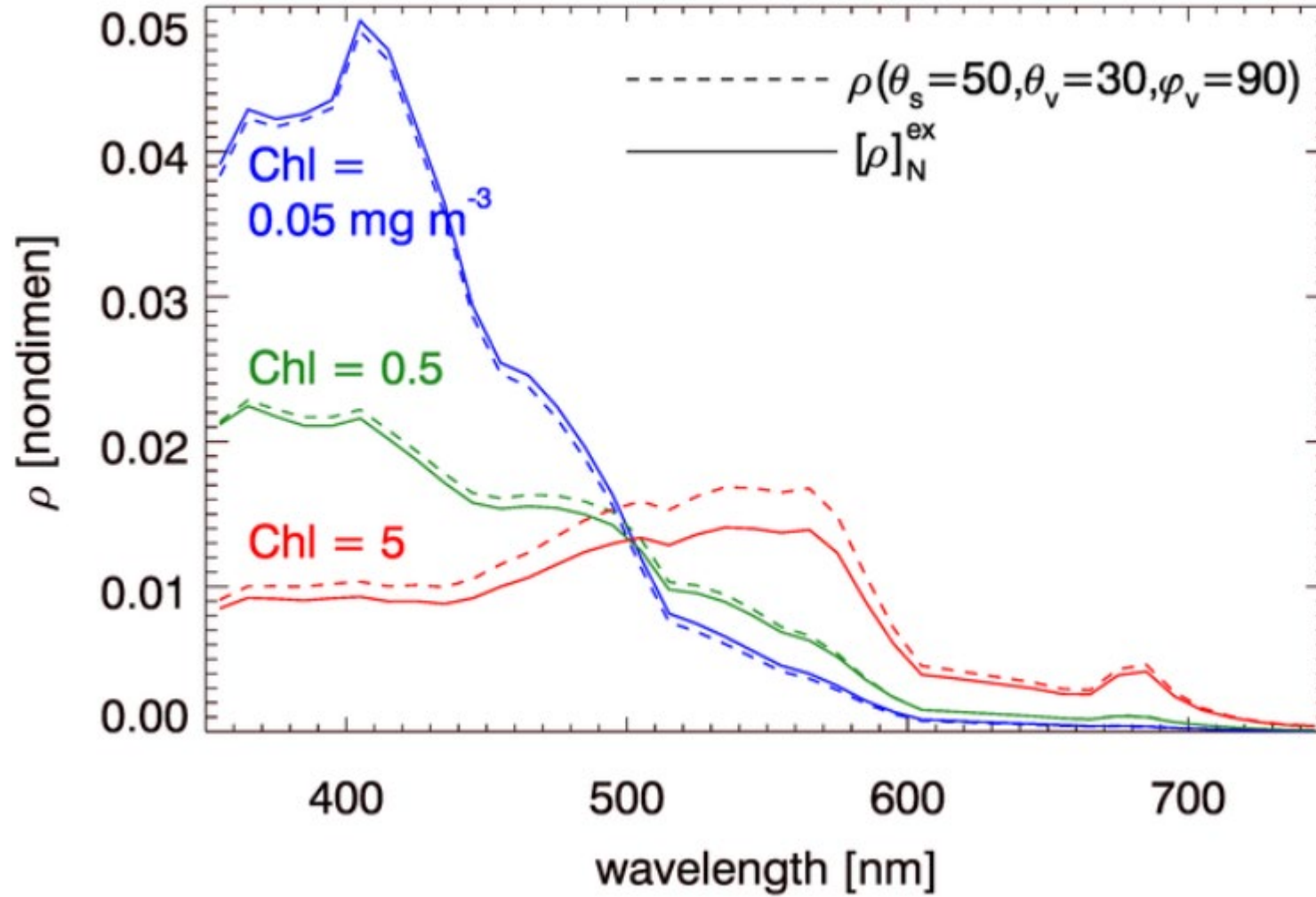


# Биооптические параметры

Параметр	Использование
Спектральный коэффициент яркости моря $R_{rs}$	Характеризует пространственно-временную изменчивость свойств поверхностного слоя; входной параметр для всех остальных биооптических алгоритмов
Концентрация хлорофилла $X_l$	Характеризует биомассу фитопланктона; ключевая характеристика для расчета первичной биопродукции
Показатель поглощения <b>ОРОВ</b> 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 <b>TSM</b>	Характеризует содержание взвеси в воде
Концентрация кокколитофорид $N_{coc}$	Характеризует цветение кокколитофорид

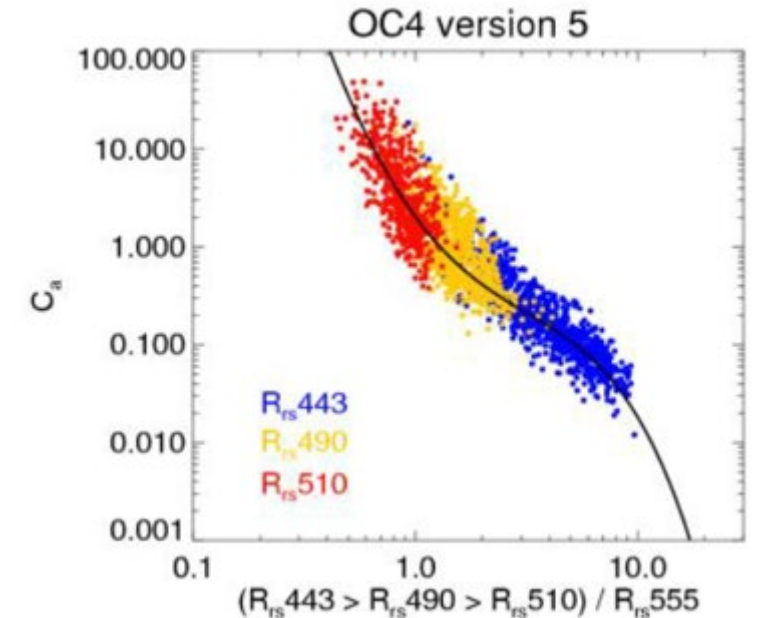


## Определение концентрации хлорофилла по данным спутниковых сканеров цвета

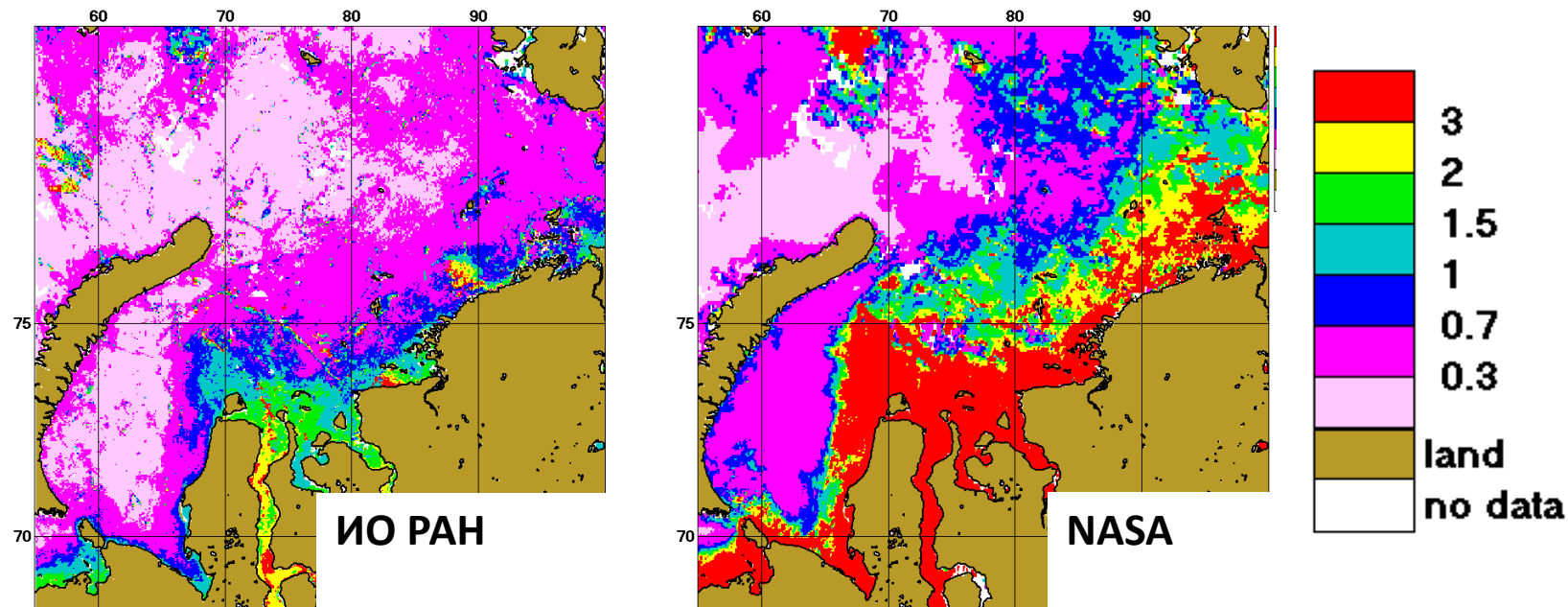


$$R = \frac{\rho(\lambda_{\text{blue}})}{\rho(\lambda_{\text{green}})}$$

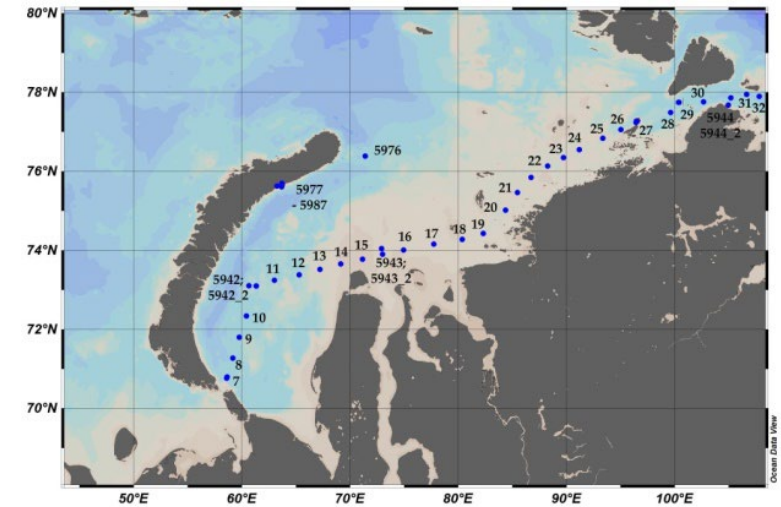
$$\log_{10}(\text{chl}) = \sum_{i=0}^4 c_i (\log_{10} R_{\text{max}})^i$$



# Необходимость разработки региональных алгоритмов



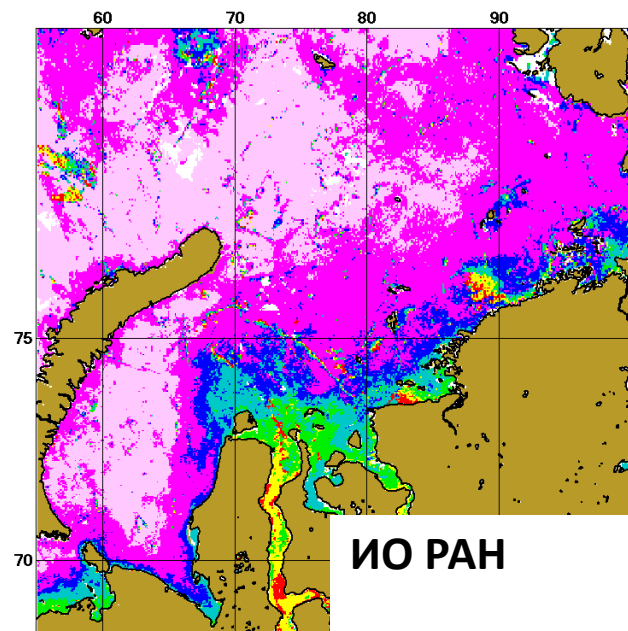
Среднемесячные распределения концентрации хлорофилла *a* (мг м<sup>-3</sup>) в Карском море в августе 2018 г. по данным спутникового сканера цвета MODIS. Средняя относительная ошибка алгоритма ИО РАН - **69 %**, NASA – **850 %**. Валидация проведена по данным прямых измерений, выполненных в 72-м рейсе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



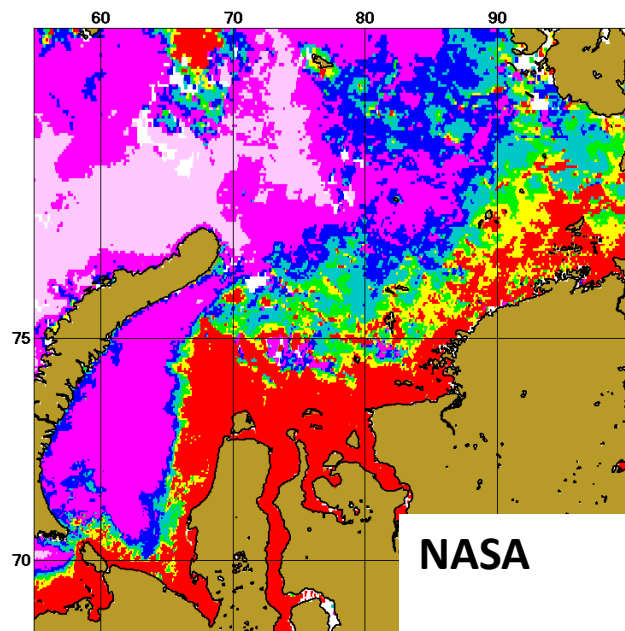
72-й рейс НИС «Академик Мстислав Келдыш», август-сентябрь 2018 г.



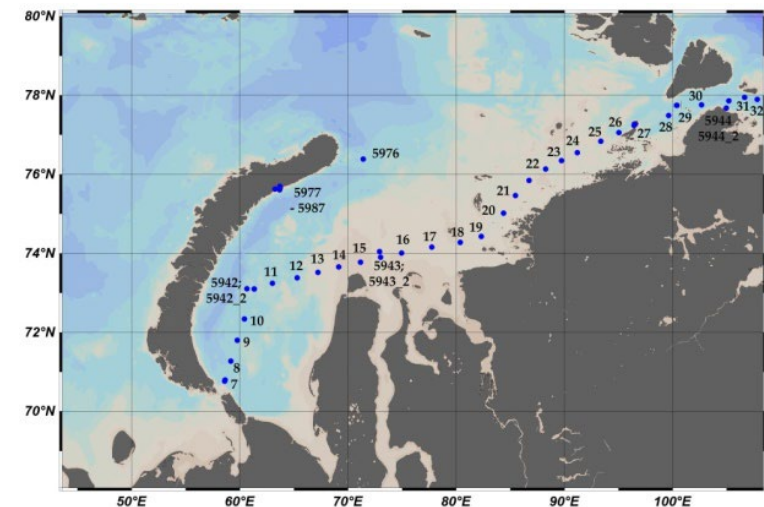
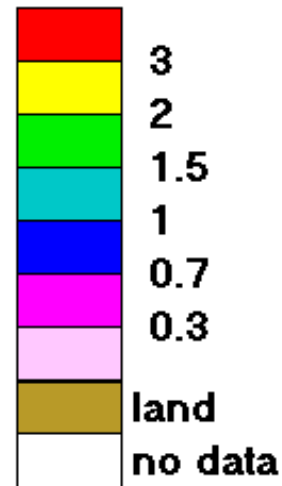
# Необходимость разработки региональных алгоритмов



ИО РАН



NASA



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

Среднемесячные распределения концентрации хлорофилла  $a$  ( $\text{мг м}^{-3}$ ) 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».

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

# Экспедиционные исследования



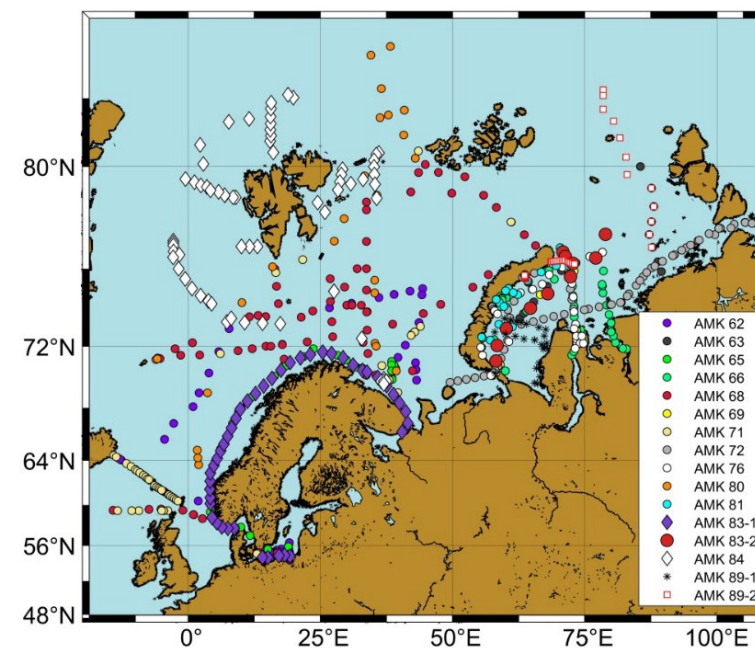
Работа на станциях

- Зондирования
- Измерения коэффициента яркости моря
- Отбор проб

Непрерывные измерения на ходу судна

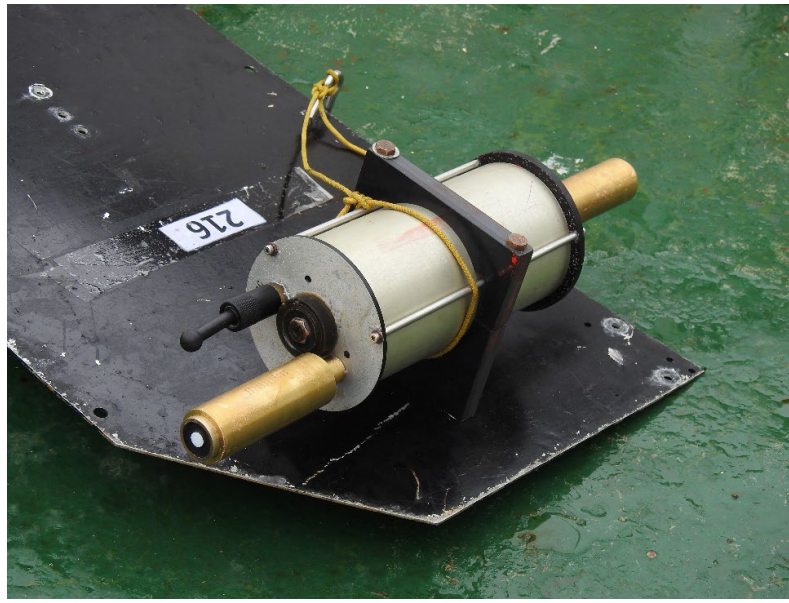
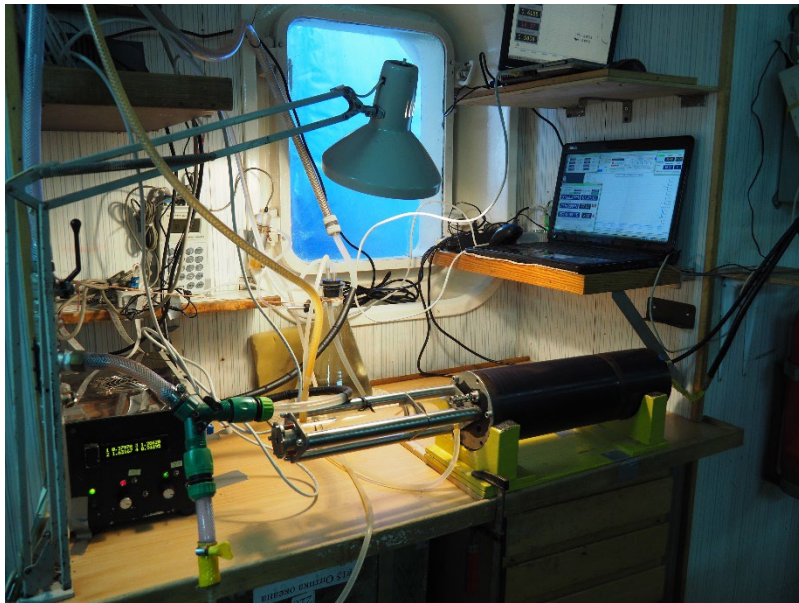
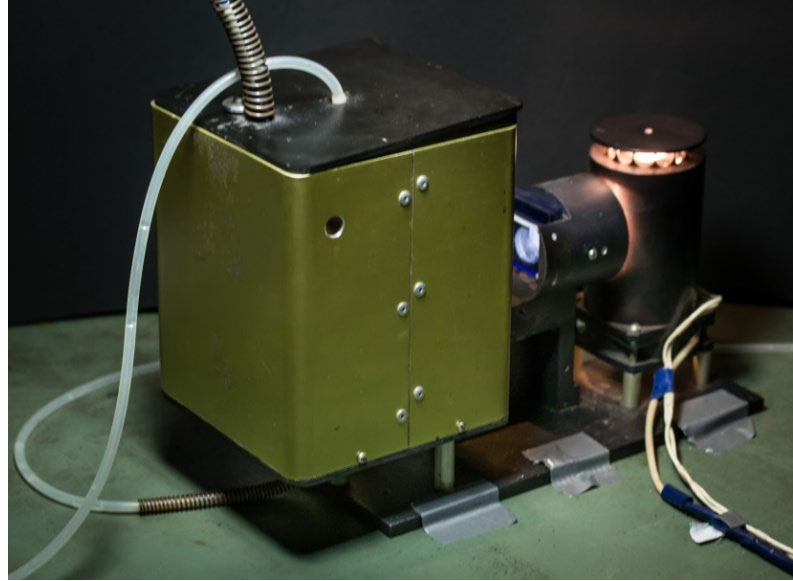
- Проточный комплекс
- Световые поля

Карта станций 2015-2022 гг.





# Данные судовых измерений



# Региональные алгоритмы, разработанные в ЛОО ИО РАН

	Хлорофилл	Взвесь	Поглощение ОРОВ	Концентрация кокколитофорид
Баренцево	+	+	+	+
Карское	+	+	+	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





# 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](#)



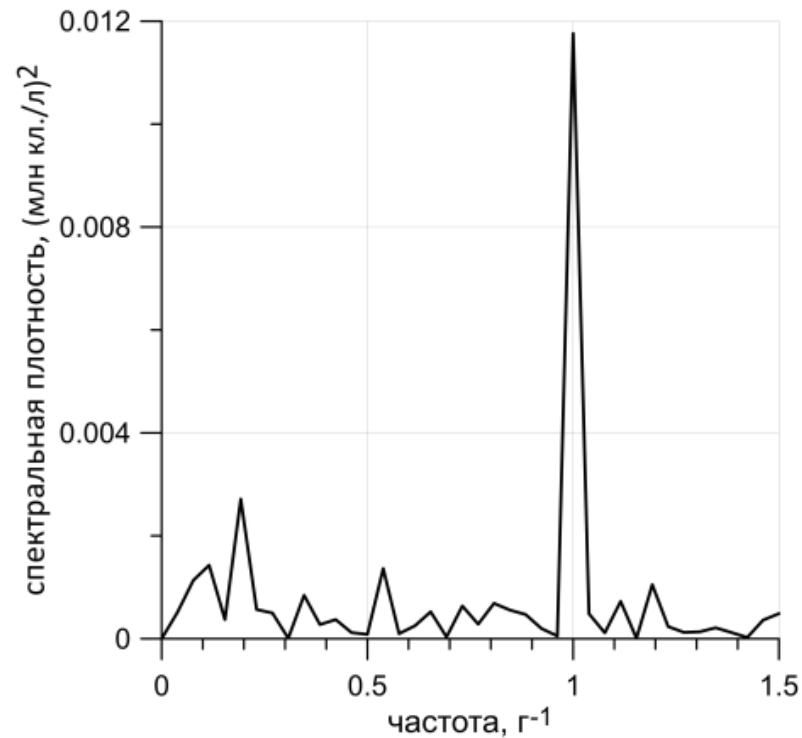
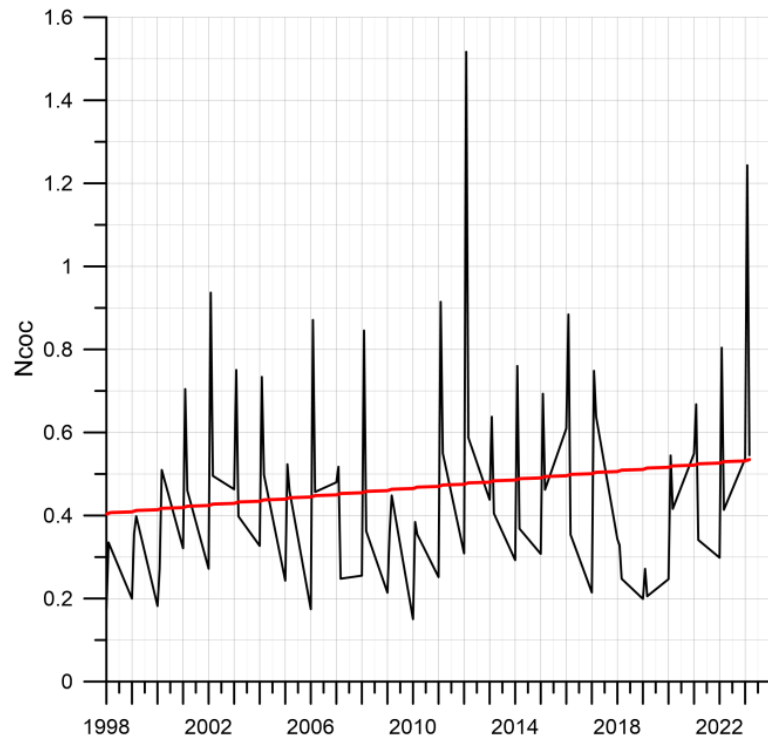
# Тренды среднемесячных значений биооптических характеристик

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)

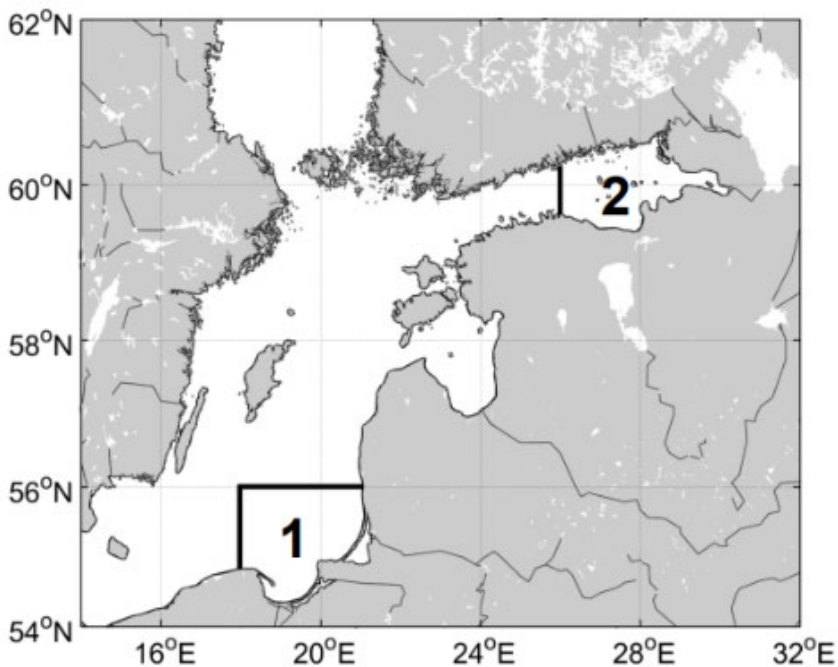


Временной ряд концентрации кокколитофорид в области цветения в Баренцевом море, красной линией показан тренд (слева), соответствующая периодограмма (справа), 1998 – 2023 гг.

# 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

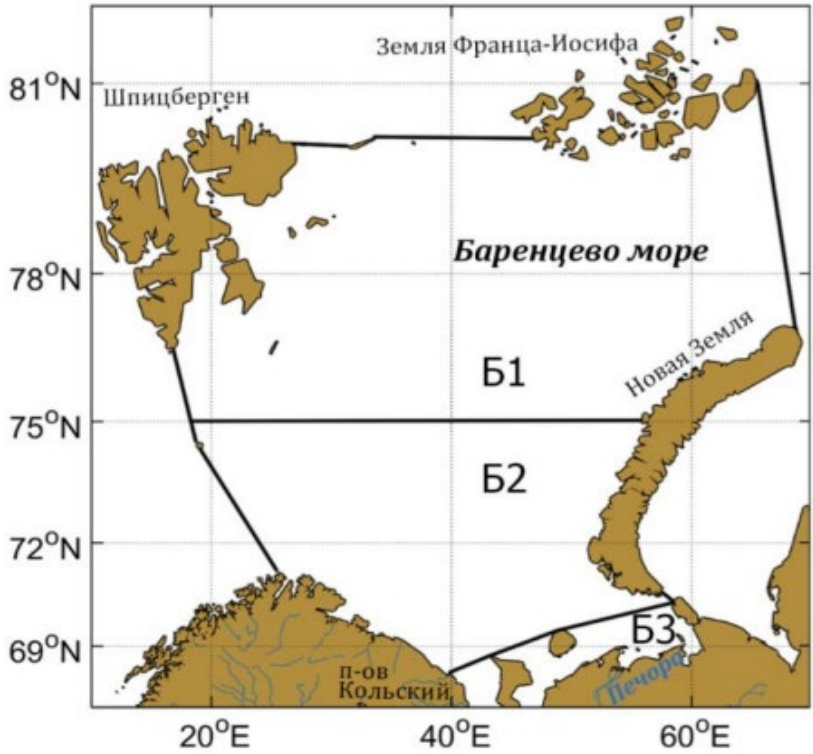


Субрегионы Балтийского моря:  
 1 – Юго-Восточная Балтика,  
 2 – восточная часть Финского залива.

# 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

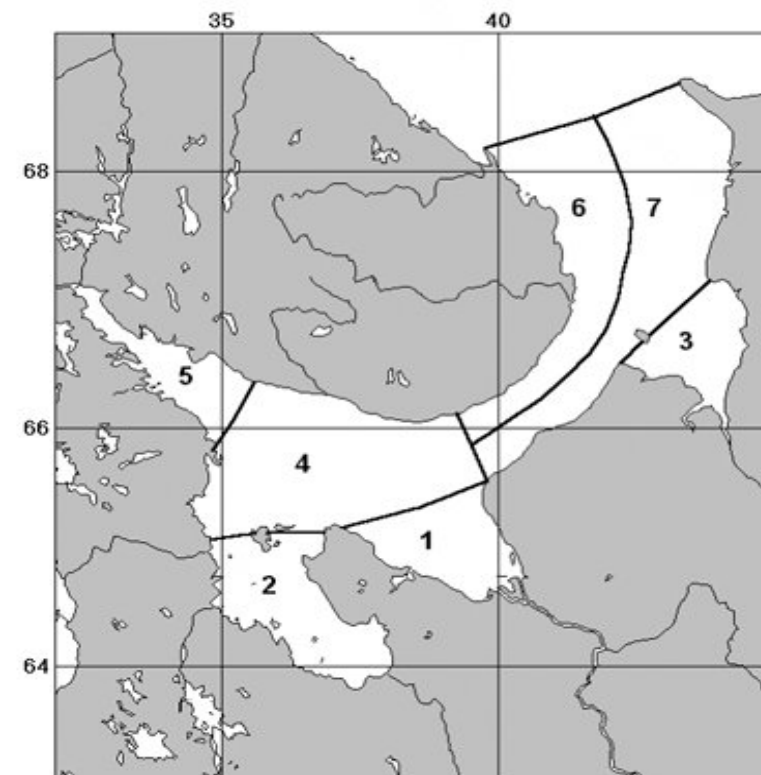


Субрегионы в Баренцевом море:  
Б1 - Северный субрегион,  
Б2 - Средний субрегион,  
Б3 - Южный субрегион

# 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,

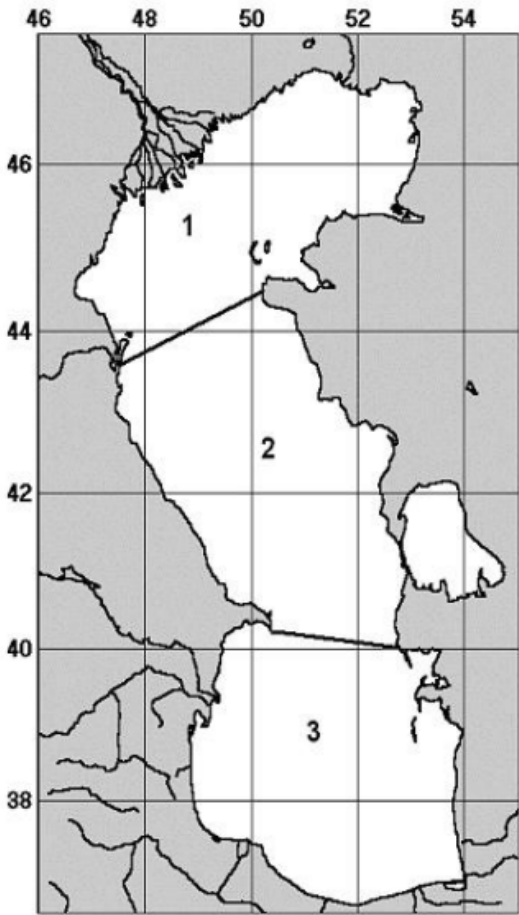
K2 – северо-восточный



# 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

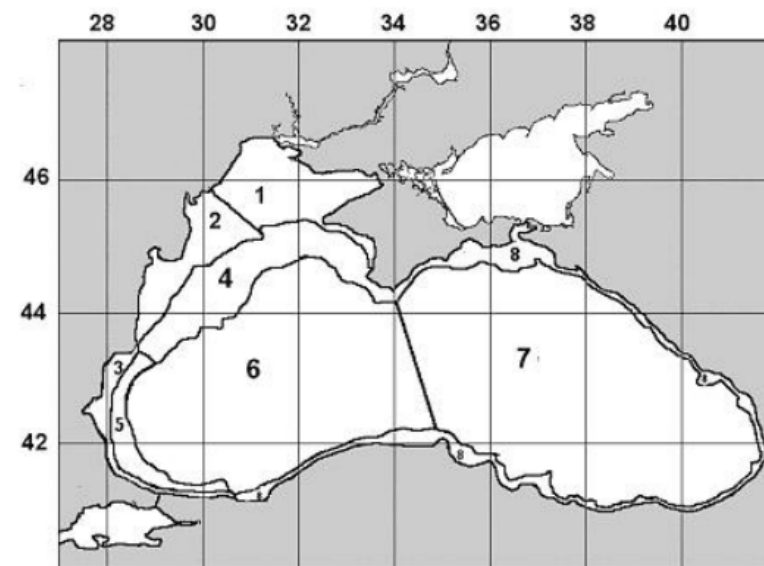


Субрегионы Каспийского моря:  
1 – Северный Каспий,  
2 – Средний Каспий,  
3 – Южный Каспий

# 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

2002-2024 гг., MODIS-Aqua



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

# 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/м<sup>3</sup>), 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<sup>-1</sup>).

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.