

Проверка и модификация спутниковых алгоритмов определения концентрации хлорофилла-а в Баренцевом море

С.В. Вазюля¹, П.Г. Каралли^{1,2}, Е.А. Аглова^{1,2}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

² Московский физико-технический институт

Содержание

1. Региональный и стандартный алгоритмы
2. Используемые данные, подходы и методы
3. Результаты по измерениям 1998, 2016-2020 гг
 - 3.1. По данным прямых определений R_{rs}
 - 3.2. По данным спутникового сканера MODIS
 - 3.4. Выводы по первому этапу модификации
4. Результаты по измерениям в 2021 г.
 - 4.1. Иллюстрация работы алгоритмов
 - 4.2. По данным прямых определений R_{rs}
 - 4.3. По данным MODIS
5. Литература

Региональный и стандартный алгоритмы

Стандартный алгоритм ОСЗМ для оценки концентраций хлорофилла-а (Chl) по данным спутникового сканера цвета MODIS является модификацией алгоритма, разработанного для SeaWiFS (O'Reilly et al., 1998):

$$\log_{10}(\text{Chl}) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i [\log_{10}(\text{Rrs}(\lambda_{\text{blue}}) / \text{Rrs}(547))]^i, \quad (1)$$

где $\text{R}_{rs}(\lambda_{\text{blue}}) = \max(\text{R}_{rs}(443), \text{R}_{rs}(488))$.

Региональный и стандартный алгоритмы

В Лаборатории оптики океана ИО РАН на основе судовых измерений в Баренцевом море (август – сентябрь 1998 г.) был разработан **региональный алгоритм Б98** (Копелевич и др., 2018):

$$\text{Chl} = 0.37 [R_{rs}(531) / R_{rs}(547)]^{-3.25}. \quad (2)$$

Выбор спектральных каналов 531 и 547 нм обусловлен тем, что для них ошибки атмосферной коррекции обычно существенно меньше, чем для коротковолновых каналов.

Используемые данные, подходы и методы

Данные измерений в Баренцевом море в 1998, 2016–2021 гг.

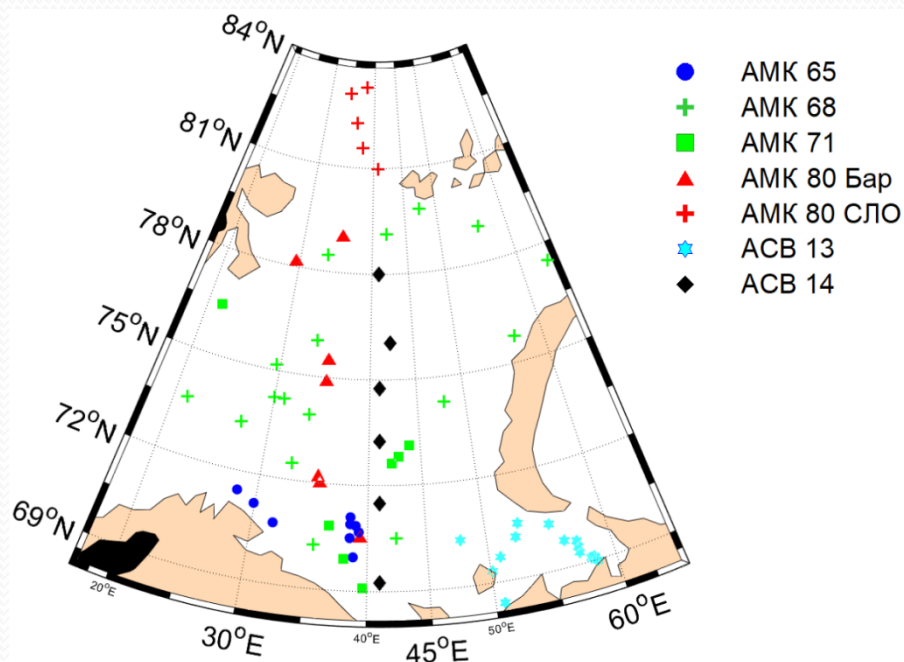
Рейс и судно	Даты измерений	Количество станций	Диапазон Chl, мг м ³
АСВ-13	11 августа – 2 сентября 1998 г.	15	0.09 – 0.79
АСВ-14	10 – 26 сентября 1998 г.	6	0.13 – 1.39
АМК-65	29 июня – 9 июля 2016 г.	9	0.20 – 0.75
АМК-68	30 июня – 7 августа 2017 г.	18	0.12 – 2.61
АМК-71	28 июня – 13 августа 2018 г.	8	0.23 – 0.70
АМК-80	31 июля – 23 августа 2020 г.	12	0.08 – 2.20
АМК-83-1	14-15 июня 2021 г.	9	0.25 – 1.09
АМК-84	28 июля – 23 августа 2021 г.	10	0.17 – 1.18

АСВ - НИС «Академик Сергей Вавилов»

АМК - НИС «Академик Мстислав Келдыш»

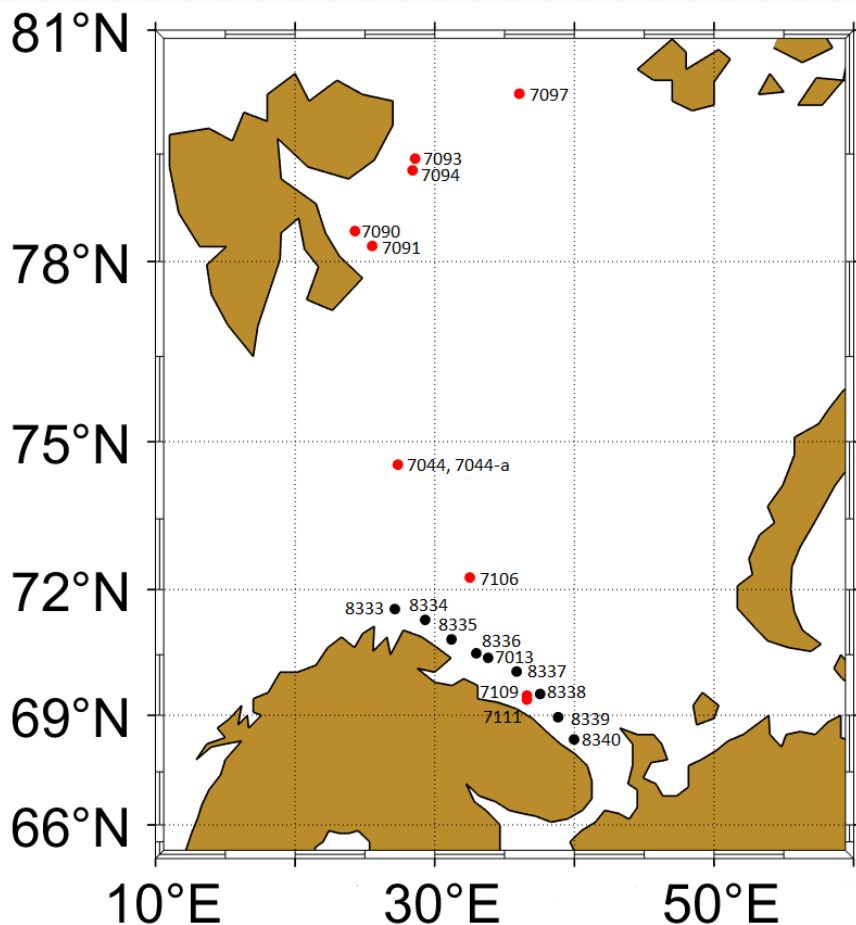
Используемые данные, подходы и методы

Расположение станций в Баренцевом море в экспедициях ИО РАН в 1998, 2016-2020 гг.



АМК 80 СЛО (Северный Ледовитый океан) - 5 станций рейса АМК-80, выполненные выше 80° с.ш. вне акватории Баренцева моря;
АМК 80 Бар - оставшиеся 7 станций.

Станции АМК 83-1 (черные точки) и АМК 84 (красные) в 2021 г.



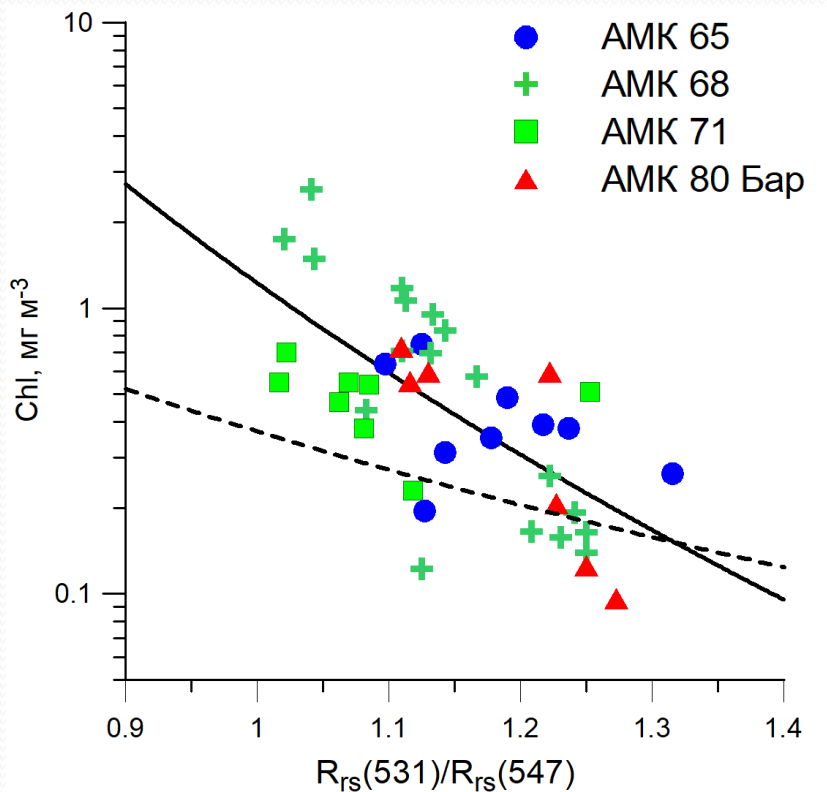
Используемые данные, подходы и методы

- Коэффициент яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ в 65 и 71 рейсах АМК определялись с борта судна с помощью палубного спектрорадиометра (Ли и др., 2015). В 68, 80, 84 и 71 (параллельно с палубным) рейсах АМК и в 13, 14 АСВ измерения проводились с помощью плавающего спектрорадиометра (Артемьев и др., 2000). В АМК 83-1 спектры R_{rs} определялись по измерениям ручного радиометра ASD Hand Held.



- Пробы морской воды отбирались в поверхностном слое (0-5 м) для определения **концентраций хлорофилла-а** флуориметрическим методом.
- Для **модификации регионального алгоритма Б98** использовались данные только для **42 станций**, выполненных в **2016-2020 гг.** (Каралли, Вазюля, 2021).
- Для **тестирования** различных алгоритмов использовались все доступные данные для Баренцева моря, включая полученные летом 2021 г., которые не были представлены в (Каралли, Вазюля, 2021).
- Спутниковые данные 2-го уровня сканеров цвета **MODIS-Aqua** и **MODIS-Terra**, были получены с сайта **NASA**. **Временной интервал** между натурными измерениями и съёмкой спутникового сканера цвета ограничивался **24 часами**.

По данным прямых определений R_{rs}



Сопоставление величины Chl и отношения $R_{rs}(531)/R_{rs}(547)$, по данным натуральных измерений. Пунктирная линия – региональный алгоритм Б98, Сплошная линия – модификация формулы (2):

$$\text{Chl} = 1.22 [R_{rs}(531)/R_{rs}(547)]^{-7.58} \quad (3)$$

Коэфф. детерминации $R^2 = 0.45$,
 $N = 42$,

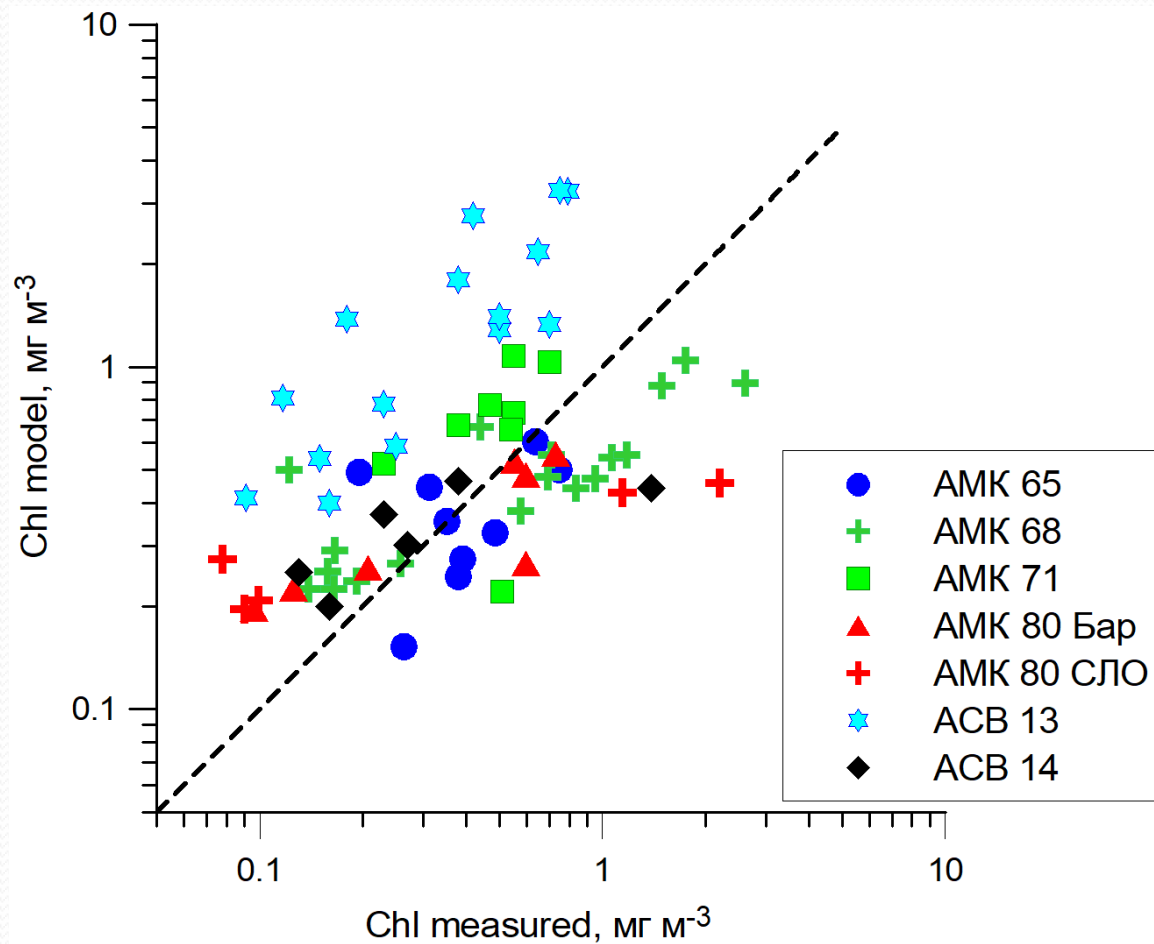
среднеквадратичная ошибка

$$S_{sq} = 0.39 \text{ мг м}^{-3},$$

относительная ошибка

$$S_r = 54\%$$

По данным прямых определений R_{rs}

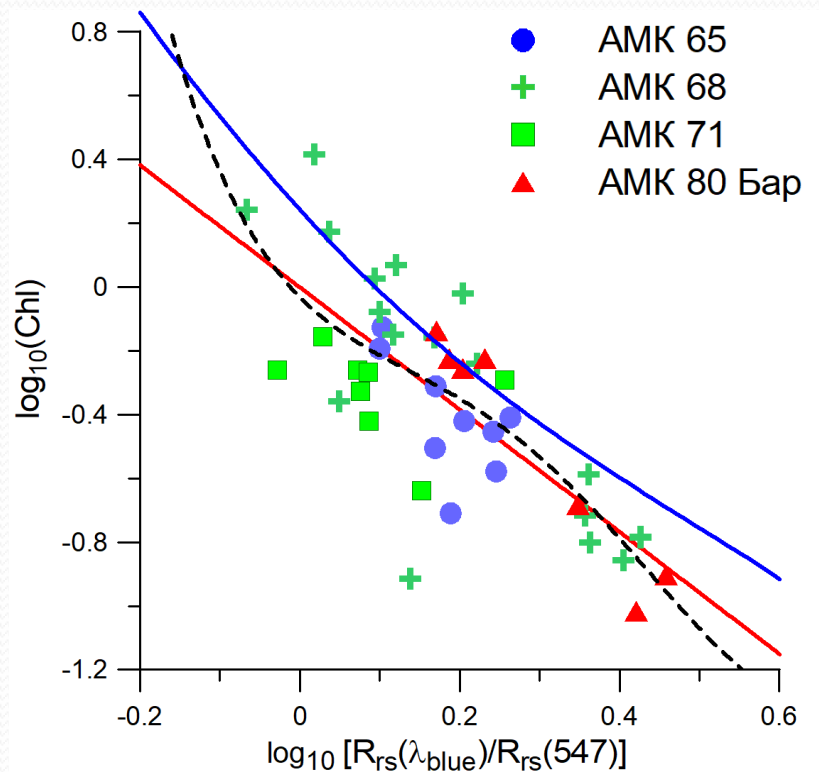


Соответствие между измеренными и рассчитанными по формуле (3) величинами Chl.

Пунктирная линия – идеальное соответствие.

$R^2 = 0.46$,
 $N = 53$ (см. (Каралли, Вазюля, 2021)),
 $S_{sq} = 0.45 \text{ мг м}^{-3}$,
 $S_r = 60\%$

По данным прямых определений R_{rs}



Сопоставление величины Chl и отношения $R_{rs}(\lambda_{\text{blue}})/R_{rs}(547)$.

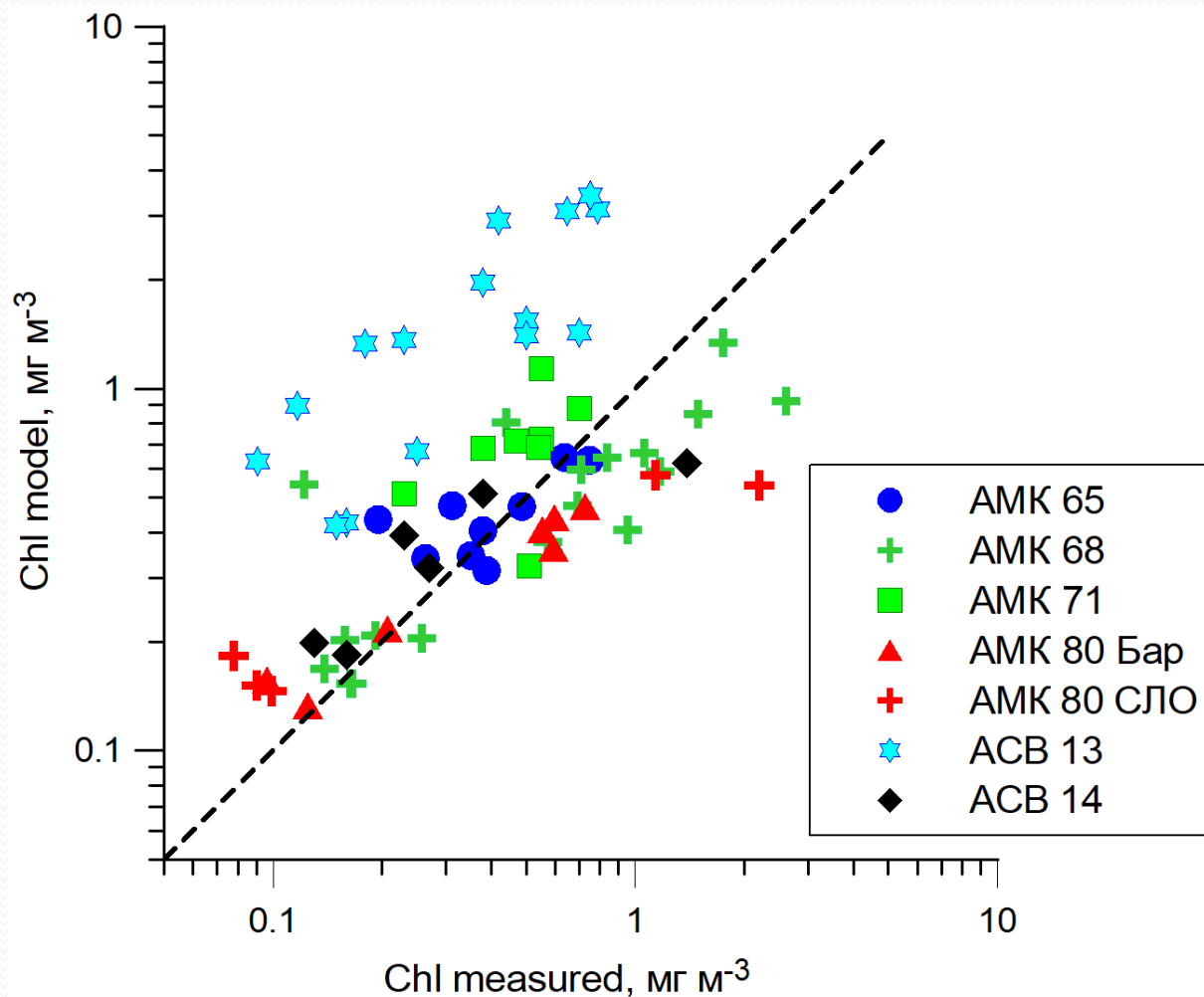
Синяя линия – алгоритм OC3M
Красная линия – линейная корреляция:

$$\log_{10}(\text{Chl}) = -0.00090 - 1.91 \cdot \log_{10}(R_{rs}(\lambda_{\text{blue}})/R_{rs}(547)) \quad (4)$$

$$R^2 = 0.586, N = 42, S_{\text{sq}} = 0.37 \text{ мг м}^{-3}$$
$$S_r = 44\%$$

Черный пунктир корреляция для полинома 4 степени ($R^2 = 0.597$)

По данным прямых определений R_{rs}



**Соответствие
между
измеренными и
рассчитанными по
формуле (4)
величинами Chl.**

Пунктирная линия –
идеальное
соответствие.

$$R^2 = 0.64, N = 53,$$
$$S_{sq} = 0.42 \text{ мг м}^{-3},$$
$$S_r = 46\%$$

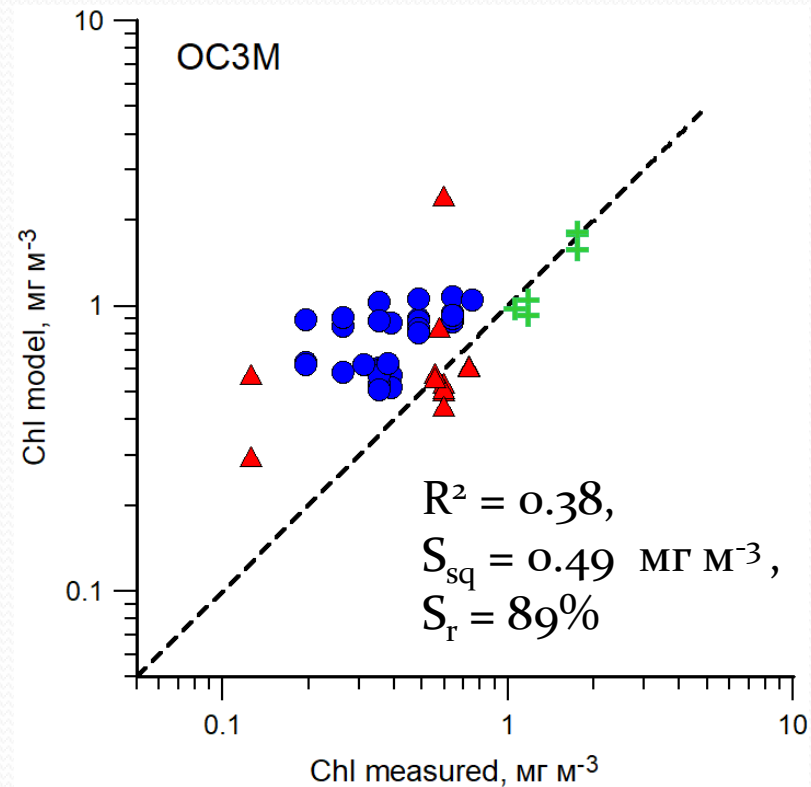
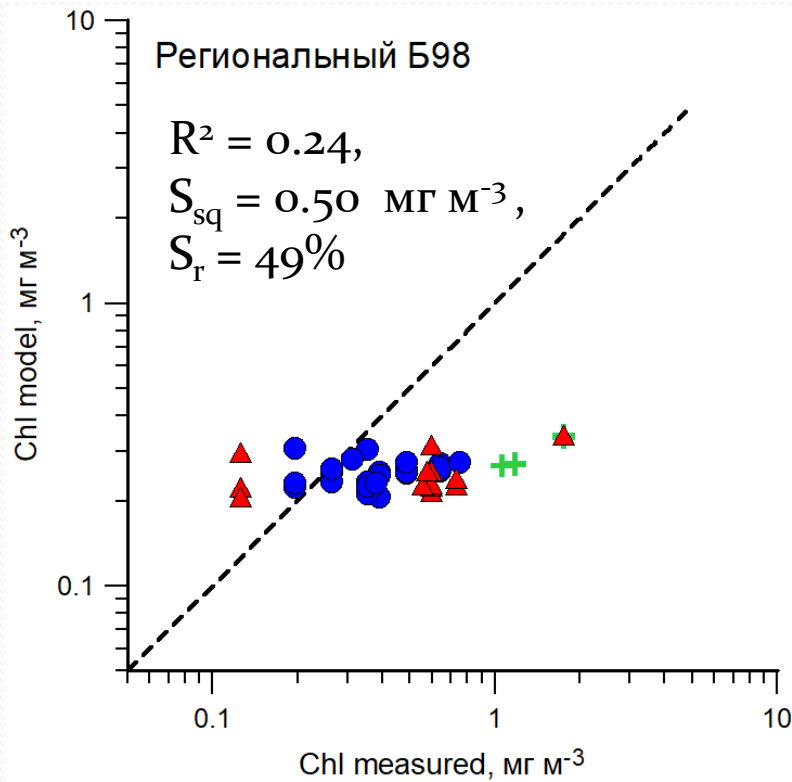
По данным прямых определений R_{rs} в 1998, 2016-2020 гг.

Алгоритм	Массив алгоритма (42 ст.)			Все станции, кроме АСВ-13 (53 ст.)		
	R^2	S_{sq} , мг м ⁻³	S_r	R^2	S_{sq} , мг м ⁻³	S_r
Формула (3)	0.45	0.39	54%	0.46	0.45	60%
Формула (4)	0.59	0.37	44%	0.64	0.42	46%
Региональный Б98	0.45	0.56	50%	0.46	0.60	52%
ОСЗМ	0.57	0.46	79%	0.62	0.47	84%

Формально алгоритм Б98 имеет почти такие же средние относительные ошибки 50-52% и более высокие среднеквадратичные $S_{sq} = 0.56$ и 0.60 мг м⁻³. Но в реальности при использовании этого алгоритма, например, для массива из 53 станций, все полученные оценки Chl лежат в узком диапазоне 0.15-0.35 мг м⁻³, в то время как по данным прямых измерений величина Chl изменялась от 0.1 до 2.6 мг м⁻³.

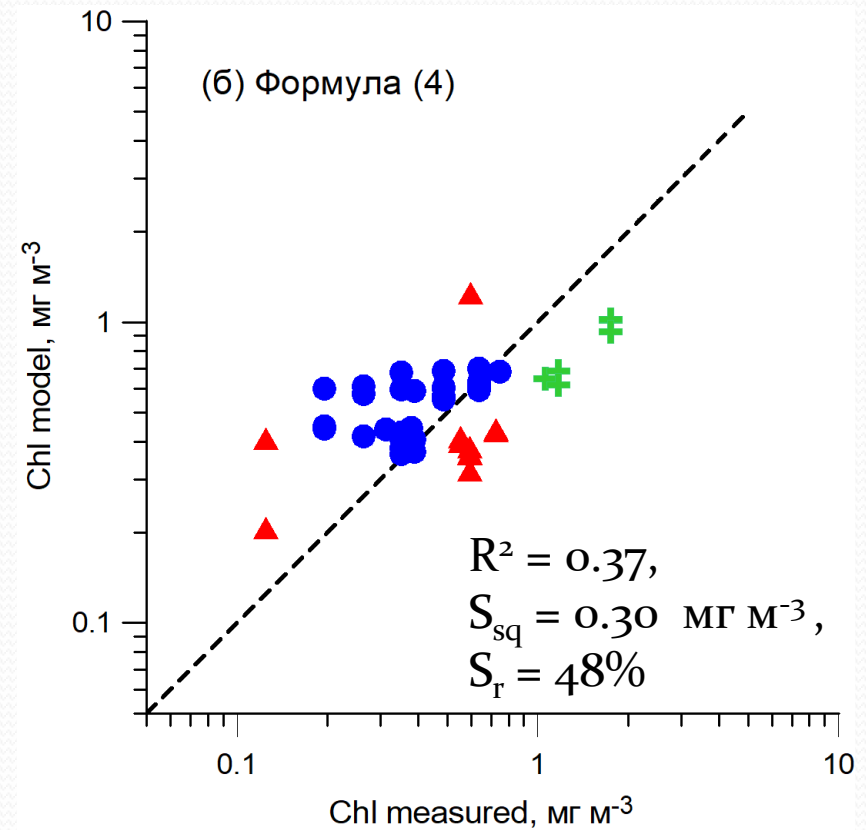
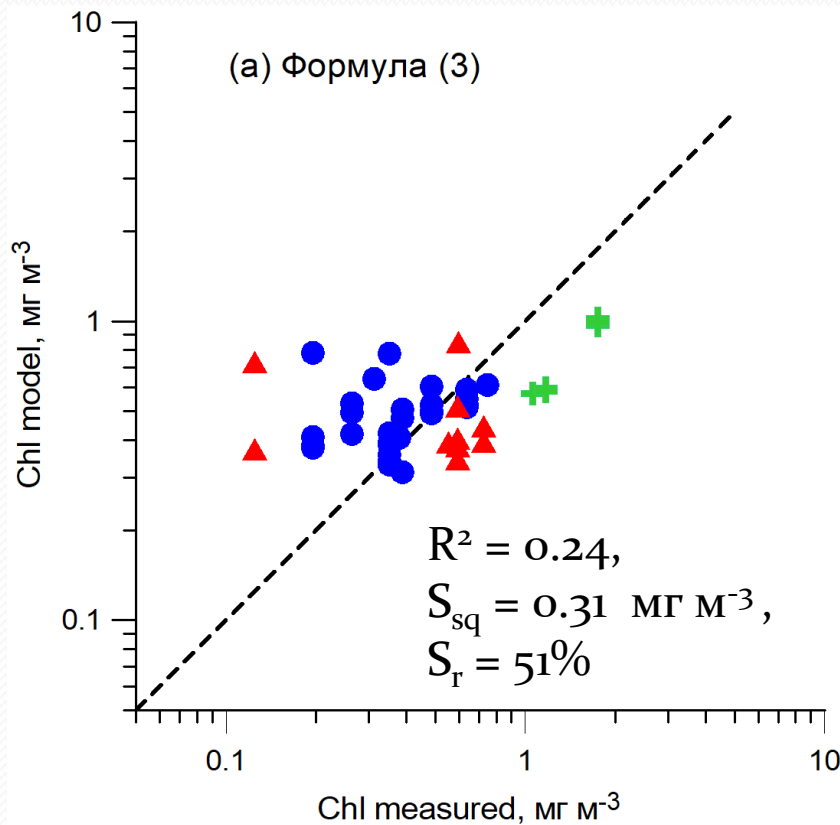
По данным спутникового сканера MODIS

Для 2016-2020 гг. было найдено 54 подходящих спутниковых измерений для 16 станций.



Соответствие между измеренными и рассчитанными по спутниковым данным величинами Chl

По данным спутникового сканера MODIS

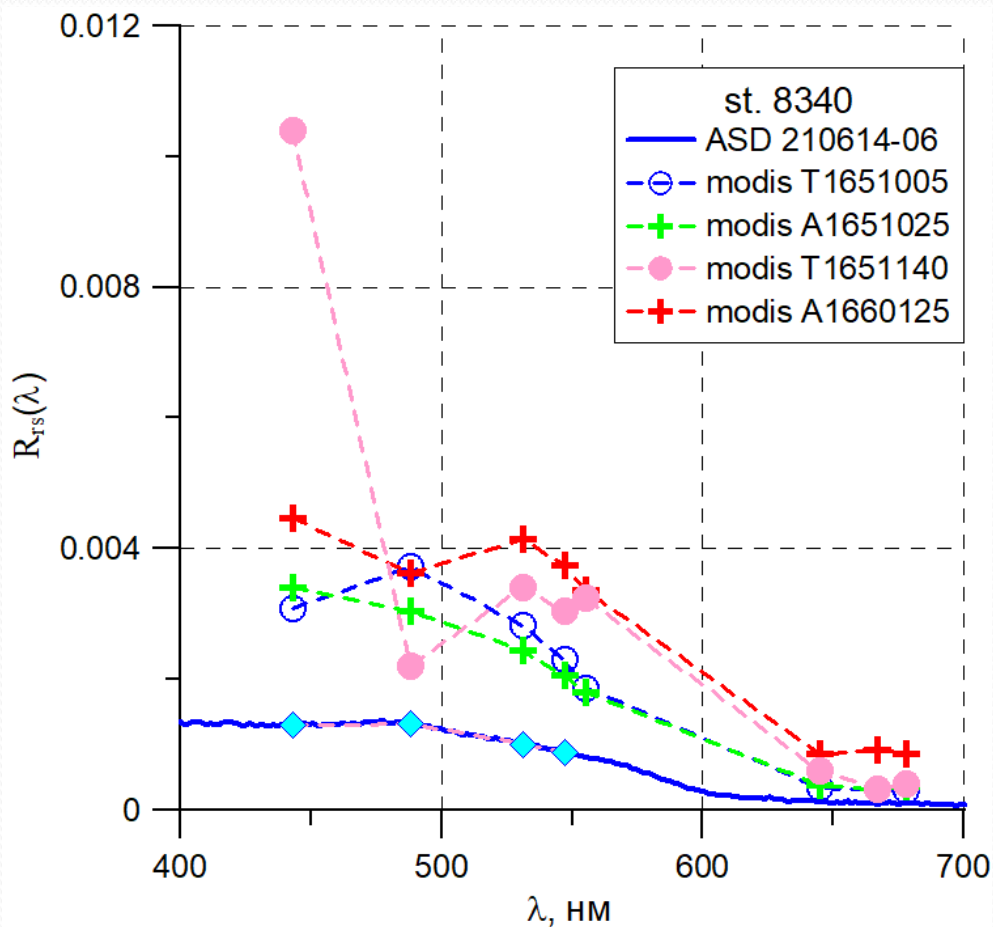


Соответствие между измеренными и рассчитанными по спутниковым данным величинами Chl

Выводы по первому этапу модификации (Каралли, Вазюля, 2021)

- **региональный алгоритм Б98**, созданный в основном по данным для Печорского моря, не пригоден для открытой акватории Баренцева моря
- **стандартный алгоритм ОСЗМ** дает завышенные оценки Chl в малопродуктивных водах, что приводит к высоким значениям средней относительной ошибки
- **новые формулы (3-4)** позволяют с приемлемой точностью определять величину Chl как по данным прямых измерений, так и по данным спутникового сканера цвета MODIS
- **использование формулы (4)** дает несколько меньшие ошибки и более высокий коэффициент детерминации, но для окончательного выбора необходима проверка по большему количеству подспутниковых измерений Chl.

Иллюстрация работы алгоритмов определения Chl на примере ст. 8340 16.06.2021



Сопоставление спектров коэффициентов яркости моря R_{rs} , полученных с помощью ручного радиометра ASD Hand Held и спутникового сканера MODIS. Каналы 412 и 469 нм для спутниковых данных не показаны, т.к. они не используются для расчета Chl.

Иллюстрация работы алгоритмов определения Chl на примере ст. 8340 16.06.2021

Соответствие между величинами Chl, рассчитанными по спутниковым и натурным измерениям R_{rs} . Концентрация Chl по измерениям на пробе 0.45 мг м^{-3} .

Данные	T20211651005	A20211651025	T20211651140	A20211660125	In situ ASD
Разница во времени, час.	-21.9	-21.6	-20.3	-6.6	0
Флаги		STRAYLIGHT	HISATZEN STRAYLIGHT HIPOL	HISOLZEN HIPOL	
Индекс цвета (CI)					
CI_443_488	1.62	1.65	3.41	1.19	1.50
CI_531	1.23	1.18	1.12	1.11	1.15
Концентрация Chl, мг м⁻³ (относительная ошибка, %)					
ОСЗМ	0.56 (23%)	0.53 (19%)	0.16 (65%)	1.11 (146%)	0.65 (44%)
Формула (4)	0.40 (12%)	0.38 (15%)	0.10 (79%)	0.71 (58%)	0.46 (2%)
Формула (3)	0.25 (44%)	0.34(24%)	0.53 (18%)	0.56 (24%)	0.42 (7%)

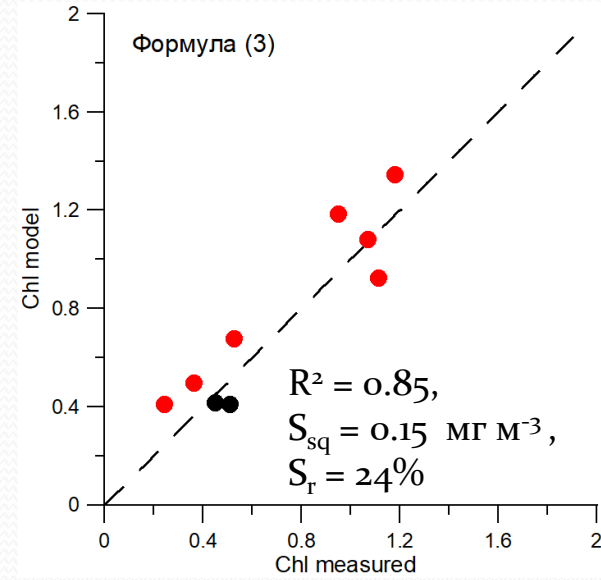
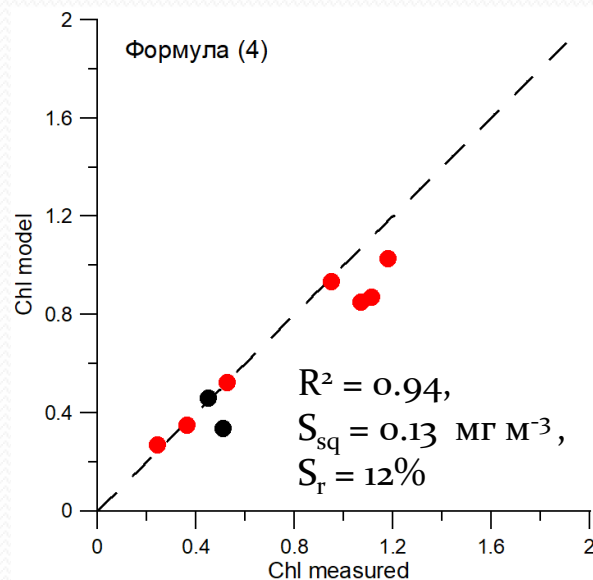
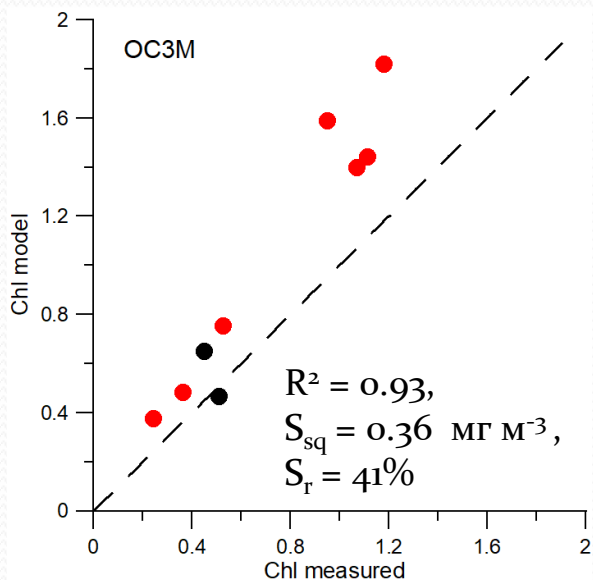
Алгоритм ОСЗМ и формула (4) используют CI_443_488, формула (3) - CI_531.

Иллюстрация работы алгоритмов определения Chl на примере ст. 8340 16.06.2021

- **Флаг STRAYLIGHT**, который отвечает за засветку на краю облака или вблизи суши, в данном случае не сильно влияет на ошибки измерений. Более важными оказываются флаги **HISATZEN** (большие углы наблюдения на краю снимка) и **HISOLZEN** (большие углы солнца, в данном случае это практически «ночной» снимок). Возможно надо учитывать количество флагов.
- Если взять **средние по 4-м пролетам**, получим 0.59, 0.40 и 0.43 мг м⁻³ для ОСЗМ, формул (4) и (3), соответственно, т.е. относительные ошибки составят 31%, 12% и 6%. Это дает надежду, что усредненные **данные 3-го уровня** позволяют определять Chl с приемлемой точностью.
- В целом для **данной станции региональные алгоритмы дают меньшие ошибки**, как по данным натурных оптических измерений, так и по спутниковым данным. А если посмотреть на то, как отличаются спутниковые спектры R_{rs} от натурального, то даже удивительно, что получаются сопоставимые величины Chl по натурным и спутниковым данным.

По данным прямых определений R_{rs} в 2021 г.

Соответствие между измеренными и рассчитанными величинами Chl. Черные точки – АМК 83-1 (N=2), красные - АМК 84 (N=7); пунктирная линия – идеальное соответствие.



- В целом полученное в 2021 г. соответствие между измеренными и рассчитанными величинами Chl существенно лучше, чем в предыдущие годы.
- При этом региональные алгоритмы дают заметно меньшие ошибки.

По данным MODIS в 2021 г.

Соответствие между величинами Chl, измеренными и рассчитанными по спутниковым данным, в зависимости от наличия флагов.

Массив данных	Все (N = 41)		match-up , не отмеченные флагами (N = 8)	
	S_{sq} , мг м ⁻³	S_r	S_{sq} , мг м ⁻³	S_r
ОСЗМ	0.41	78%	0.31	62%
формула (4)	0.40	59%	0.36	48%
формула (3)	0.96	77%	0.36	59%

- Даже при отсутствии флагов средние относительные ошибки довольно высоки для всех тестируемых алгоритмов, что связано с большими ошибками в малопродуктивных водах.
- Абсолютные среднеквадратичные ошибки соответствуют полученным ранее оценкам точности во всех случаях кроме использования формулы (3) для всего массива данных, где для 2 точек match-up были получены аномально высокие оценки Chl по спутниковым данным.

Литература

1. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // *Океанология*. 2000. Т.40. № 1. С.148–155.
2. Каралли П.Г., Вазюля С.В. Модификация регионального спутникового алгоритма определения концентрации хлорофилла-а в Баренцевом море // *Труды XI Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод»*. 2021.
3. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018.
4. Ли М.Е., Шибанов Е.Б., Мартынов О.В., Корчемкина Е.Н. Определение концентрации примесей в морской воде по спектру яркости восходящего излучения // *Морской гидрофиз. журн.* 2015. Т. 186. № 6. С. 17–33.
5. O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., Garver S.A., Kahru M., McClain C. R. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS// *Journal of Geophysical Research*. 1998. N.103, P.24937-24953.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект №21-77-10059).

Авторы благодарят А.Б. Демидова, А.В. Лифанчук, Н.В. Политову и М.Д. Кравчишину за предоставленные результаты измерений концентрации хлорофилла-а; В.А. Артемьева, А.Н. Храпко, А.В. Григорьева, Д.И. Глуховца, П.А. Салюка за предоставленные результаты измерений спектров R_{rs} ; И.В.Салинг за подбор спутниковых данных.

An aerial photograph of a floating buoy in the ocean. The buoy is a cylindrical metal structure with various instruments and sensors attached. It is connected to a yellow and green striped rope that extends across the water. The water surface is dark blue with some white foam or ice patches. The text "Спасибо за внимание!" is overlaid in white on the left side of the image.

Спасибо за внимание!

Измерения R_{rs}
плавающим
спектрорадиометром