

Региональный алгоритм оценки концентрации хлорофилла в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета MODIS

С.В. Вазюля¹, Е.А. Аглова^{1,2}, И.В. Салинг¹

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

² Московский физико-технический институт

Содержание

1. Региональный алгоритм Б98
2. Используемые данные и методы
3. Региональный алгоритм Б22
4. Верификация Б22 по данным проточного флуориметра
5. Литература

Региональный алгоритм Б98

Алгоритм Б98 (Копелевич и др., 2018) для оценки концентрации хлорофилла *a* (Chl) в Баренцевом море разработан на основе судовых измерений (август–сентябрь 1998 г.):

$$\text{Chl Б98} = 0.37 [R_{rs}(531) / R_{rs}(547)]^{-3.25}.$$

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

В работе (Каралли, Вазюля, 2021) показано, что региональный алгоритм Б98 непригоден для открытой акватории Баренцева моря, так как был создан в основном по данным измерений в Печорском море (15 станций из 21), которое характеризуется повышенным содержанием ОРОВ.

Используемые данные и методы

- массив подспутниковых измерений, выполненных в 2016 – 2020 гг., для сканеров цвета MODIS Aqua/Terra - 26 пар (интервал времени между судовыми и спутниковыми измерениями менее 12 часов)
- Пробы морской воды для определения концентрации Chl флуориметрическим методом отбирались в поверхностном слое (0-5 м).
- непрерывные распределения интенсивности флуоресценции Chl, полученные с помощью проточного комплекса (Glukhovets, Goldin, 2021) в рейсах 83-1 и 68 НИС «Академик Мстислав Келдыш» (АМК) в июне 2021 и августе 2017, соответственно, и калиброванные по данным прямых определений концентрации Chl на станциях.

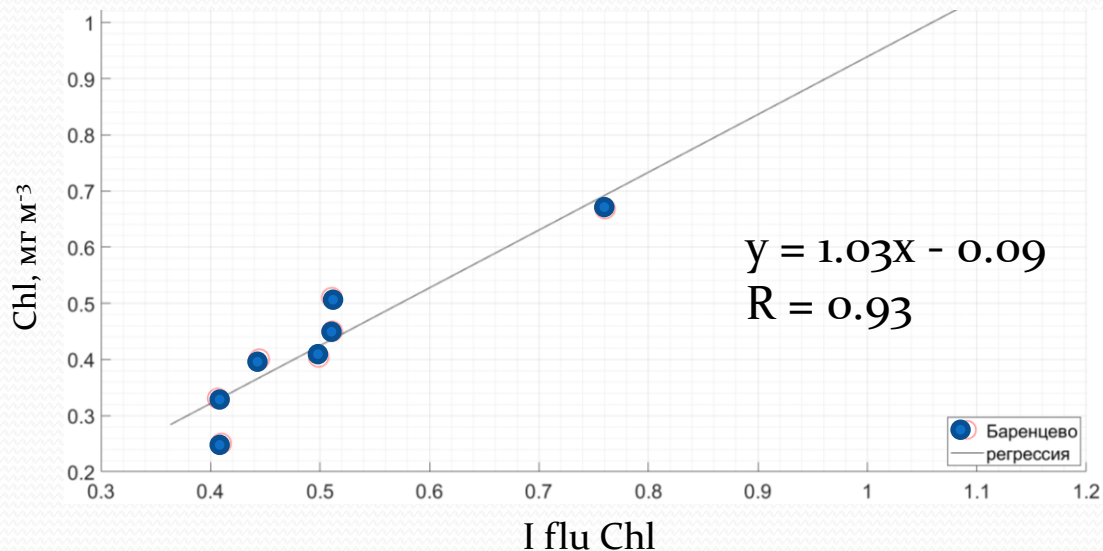
Используемые данные и методы



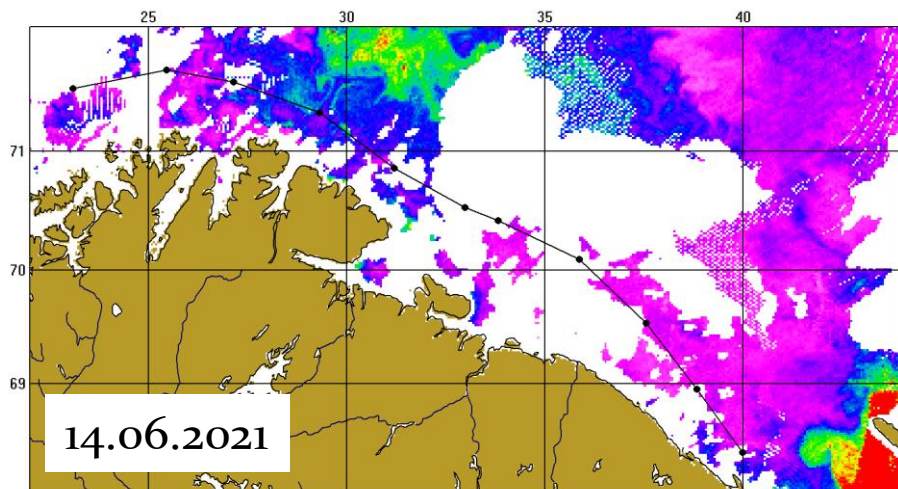
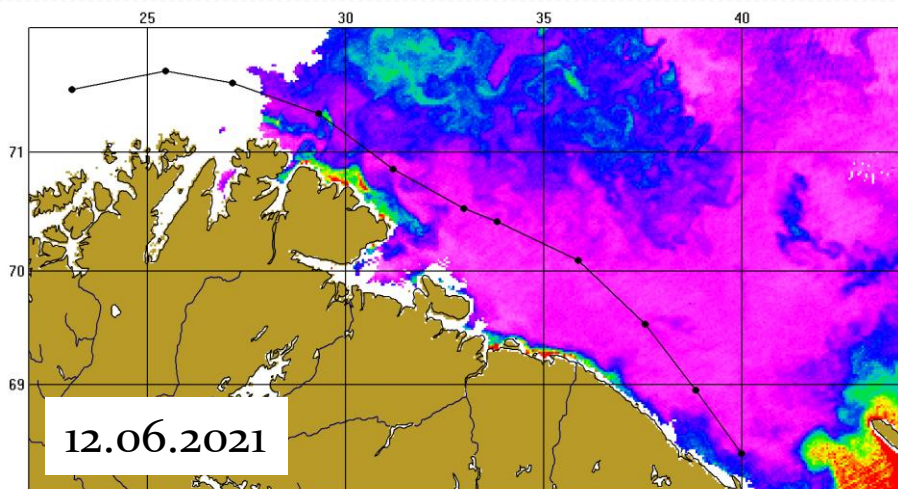
Двухканальный проточный флуориметр ПФД-2 предназначен для непрерывных измерений на ходу судна интенсивностей флуоресценции хлорофилла *a* и ОРОВ, индуцированных излучением сверхъярких светодиодов.

Для калибровки использовались концентрации Chl, измеренные на станциях, и значения флуоресценции Chl по проточному комплексу с осреднением ± 1 км.

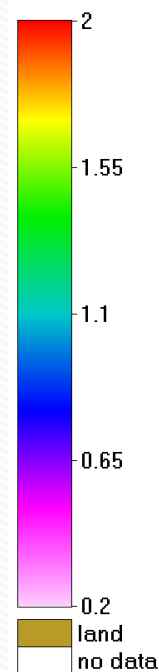
АМК 83-1, Баренцево море, июнь 2021



Используемые данные и методы



Chl Б22,
мг м⁻³

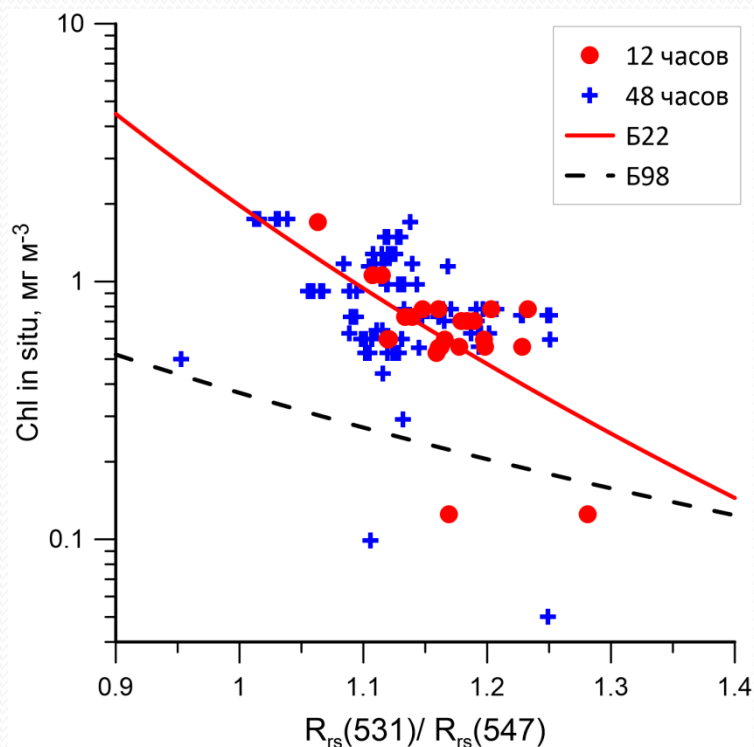


По данным MODIS Aqua рассчитывались среднесуточные композиты с отбраковкой данных с флагом STRAYLIGHT, что позволяет исключить искажение спутниковых данных вблизи облаков.

Измерения в Баренцевом море во время рейса АМК83-1 были выполнены 13-15 июня 2021 г., а спутниковые данные доступны только для 12 и 14 июня. К сожалению, 14 июня даже в суточном композите есть большие пропуски данных из-за облачности.

Черной линией показан маршрут судна

Региональный алгоритм Б22



В алгоритме Б22 (Glukhovets et al., 2022) используется тот же индекс цвета, что и в Б98:

$$\text{Chl}_{\text{Б22}} = 1.97 [R_{rs}(531)/R_{rs}(547)]^{-7.76}.$$

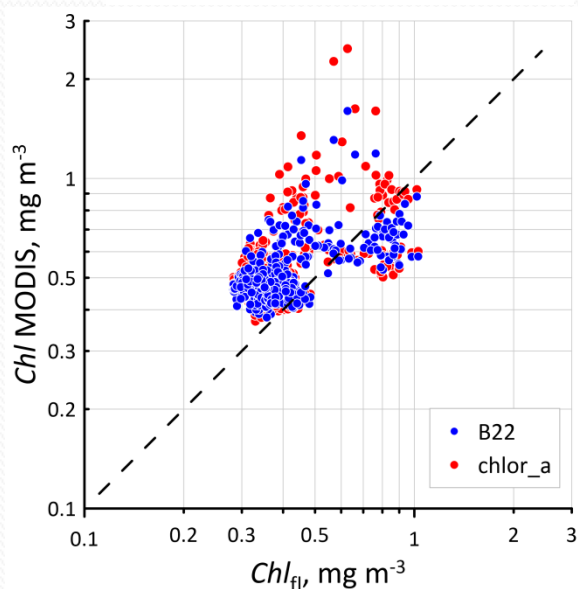
Формула Б22 выведена на массиве подспутниковых измерений с интервалом времени менее 12 часов (26 пар). Средняя относительная ошибка на этом наборе данных - 38%, $\text{RMSE} = 0.21 \text{ mg m}^{-3}$, $R^2 = 0.32$ ($p\text{-value} < 0.001$).

Если увеличить допустимый интервал времени между спутниковыми и прямыми измерениями до 48 часов (121 пара), то относительная ошибка возрастает до 49%, RMSE до 0.38 mg m^{-3} .

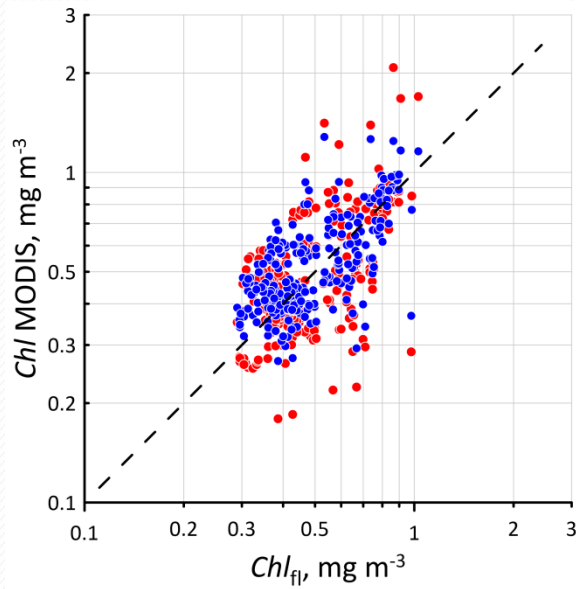
Верификация по данным проточного флуориметра

Данные рейса 83-1 интересны как наши первые измерения Хл в июне для Баренцева моря (предыдущие были в июле-сентябре) и выполненные в условиях отсутствия цветения. В случае АМК 68 измерения проводились в области сильного кокколитофоридного цветения (по данным прямых определений концентрация кокколитофорид варьировала в диапазоне 1.4-6.3 млн кл./л), которое может влиять на точность спутниковых алгоритмов оценки Chl. Величины Chl при этом были заметно выше.

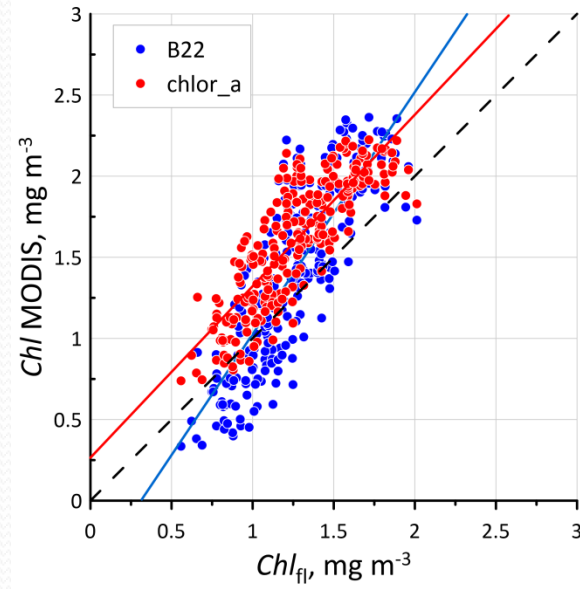
АМК 83-1, 12.06.2021



АМК 83-1, 14.06.2021



АМК 68, 14-15.08.2018



Сопоставление величин Chl, рассчитанных по спутниковым данным (Chl MODIS) и измеренных с помощью проточного флуориметра (Chl_{fl}). Пунктир – линия наилучшего соответствия.

Верификация по данным проточного флуориметра

Параметры соответствия между величинами Chl, измеренными с помощью проточного флуориметра и рассчитанными по данным MODIS стандартным и региональным алгоритмами в зависимости от массива используемых данных.

Массив данных	Алгоритм	N	R ²	RMSE, мг м ⁻³	RE, %	Bias, мг м ⁻³
АМК 83, 12.06.21	chlor_a	421	0.28	0.23	37	+0.12
	Б22		0.35	0.17	32	+0.08
АМК 83, 14.06.21	chlor_a	271	0.36	0.19	25	+0.01
	Б22		0.42	0.15	23	+0.04
АМК 68, 14-15.08.17	chlor_a	259	0.70	0.40	28	+0.34
	Б22		0.70	0.37	24	+0.16

*N – объем выборки, R² коэффициент детерминации, RMSE – среднеквадратичная ошибка, RE – средняя относительная ошибка

- Относительная и среднеквадратичная ошибки для спутниковых оценок Chl за 14 июня (23%, 0.15 мг м⁻³), более близких к времени проведения флуориметрических измерений немного ниже, чем за 12 июня (32%, 0.17 мг м⁻³).
- Сопоставление спутниковых и флуориметрических оценок величин Chl в случае кокколитофоридного цветения показало, что относительная ошибка получилась того же порядка (24%), а RMSE существенно выше (0.37 мг м⁻³), что может быть связано как с ошибками калибровки флуориметра в условиях кокколитофоридного цветения, так и с разницей во времени флуориметрических и спутниковых измерений (около суток).

Литература

1. 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. С. 234-239.
2. 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.
3. Glukhovets D., Sheberstov S., Vazyulya S, Yushmanova A, Salyuk P, Sahling I, Aglova E. Influence of the accuracy of chlorophyll-retrieval algorithms on the estimation of solar radiation absorbed in the Barents Sea // Remote Sensing. 2022, 14(19), 4995.
4. Glukhovets D.I., Goldin Y.A. Express method for chlorophyll concentration assessment // J. Photochem. Photobiol. 2021, 8, 100083.

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; Д.И. Глуховца за предоставленные результаты измерений проточного флуориметра.

