© Д.И. Глуховец, 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 1, С. 145–160

УДК. 534 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(1).44

ИССЛЕДОВАНИЕ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОД ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ БАРЕНЦЕВА И НОРВЕЖСКОГО МОРЕЙ ЛЕТОМ 2017 ГОДА

Глуховец Д.И.[1, 2]

[1]*Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail: glukhovets@ocean.ru*
[2]*Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, 141701, Россия*
Статья поступила в редакцию 29.12.2018, одобрена к печати 19.03.2019

Проведено исследование биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева и Норвежского морей летом 2017 г. Судовые данные получены в 68-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» (июнь–август 2017 г.). С помощью проточного измерительного комплекса непрерывно регистрировались интенсивности флуоресценции хлорофилла «а» и растворенного органического вещества, а также соленость и температура поверхностного слоя воды по маршруту судна. С помощью лазерного и диодного спектральных флуориметров и измерителя поглощения с интегрирующей сферой получены спектры флуоресценции и поглощения проб морской воды. Результаты сопоставлены с данными прямых определений концентрации хлорофилла. Частая сплошная облачность препятствовала использованию спутниковых данных оптического диапазона в Норвежском море. В области кокколитофоридного цветения в Баренцевом море результаты судовых измерений удалось сопоставить с данными спутникового сканера цвета OLCI. В этой области стандартные алгоритмы OLCI переоценивают значения концентрации хлорофилла, при этом регрессионный алгоритм работает лучше, чем основанный на нейронных сетях. Сравнение спектров флуоресценции и поглощения продемонстрировало возможность быстрой оценки концентрации хлорофилла по данным оптических измерений. Показано различие коэффициентов уравнений регрессии интенсивности флуоресценции хлорофилла «а» и его концентрации для разных областей.

Ключевые слова: биооптические характеристики, поверхностный слой, желтое вещество, хлорофилл, флуоресценция, Баренцево море, Норвежское море

Введение

В статье представлены результаты исследования биооптических характеристик вод поверхностного слоя Норвежского и Баренцева морей летом 2017 г. по данным судовых измерений (непрерывных проточных и выполняемых на станциях) и спутниковым данным нового сканера цвета OLCI. Эту работу следует рассматривать как продолжение исследований биооптических характеристик указанных морей, которые проводятся в экспедициях Института океанологии РАН одновременно со спутниковыми наблюдениями (Глуховец и др., 2017).

В настоящее время Норвежское и Баренцево моря привлекают особое внимание исследователей как часть Арктического региона, где происходят ярко выраженные климатические изменения (Зимин и др., 2018; Chan et al., 2019; Onarheim et al., 2018). Воды поверхностного слоя этих морей различны по своим биооптическим характеристикам. В частности, в Баренцевом море наблюдаются массовые цветения фитопланктона, весенние – диатомовых и летние – кокколитофоридные; в Норвежском море ярко выраженные массовые цветения не наблюдались. В то же время океанологические характеристики Баренцева моря в значительной степени определяются поступлением соленых и теплых атлантических вод с юго-запада, из Норвежского моря (Loeng, Drinkwater, 2007). С севера в Баренцево море поступают менее соленые и более холодные арктические воды; граница между этими водными массами в Баренцевом море – Полярный фронт (Hancke et al., 2014; Oziel et al., 2015). В августе к югу от Полярного фронта в Баренцевом море развиваются массовые кокколитофоридные цветения. Эти цветения играют важную роль в углеродном цикле океана (Rost, Riebesell, 2004), а также существенно увеличивают альбедо водной толщи и тем самым могут влиять на баланс солнечного излучения и тепловой баланс моря (Копелевич и др., 2017а). Влияние кокколитофоридных цветений на биооптические характеристики вод позволяет применять для их исследования оптические методы (Буренков и др., 2011; Smyth et al., 2002).

Основные результаты, представленные в статье, получены по данным флуоресцентных измерений в проточной системе, которые, в частности, дали возможность обнаруживать опреснение поверхностного слоя талыми ледниковыми водами (Glukhovets, Goldin, 2019), что может быть использовано для оценки происходящих в Арктическом регионе климатических изменений. В целом, пространственные распределения интенсивностей флуоресценции окрашенного органического вещества и хлорофилла могут использоваться в качестве дополнительных индикаторов типов вод. В работе использовались данные о концентрации хлорофилла, полученные с нового сканера цвета OLCI, установленного на европейском спутнике Sentinel 3. Это сканер нового поколения спутниковых измерителей цвета океана, которые призваны заменить действующие в настоящее время приборы. Комплексный подход, основанный на сочетании натурных измерений и спутниковых наблюдений, показал свою эффективность и безусловно будет использоваться и в дальнейших исследованиях.

Регион исследований

Судовые данные были получены в 68-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш». Измерения в Норвежском и Баренцевом морях проводились с 19 июля по 16 августа 2017 г. Эта часть маршрута экспедиции показана на рис. 1. Всего в Норвежском и Баренцевом морях было выполнено 69 станций. По результатам оптических измерений в Баренцевом море к югу от Полярного фронта была обнаружена область предположительного кокколитофоридного цветения. Впо-

следствии данные прямых определений видового состава фитопланктона подтвердили это предположение (Копелевич и др., 2017б). Положение области цветения находится в соответствии с результатами предыдущих работ (Буренков и др., 2011; Hovland et al., 2013; Signorini, McClain, 2009).

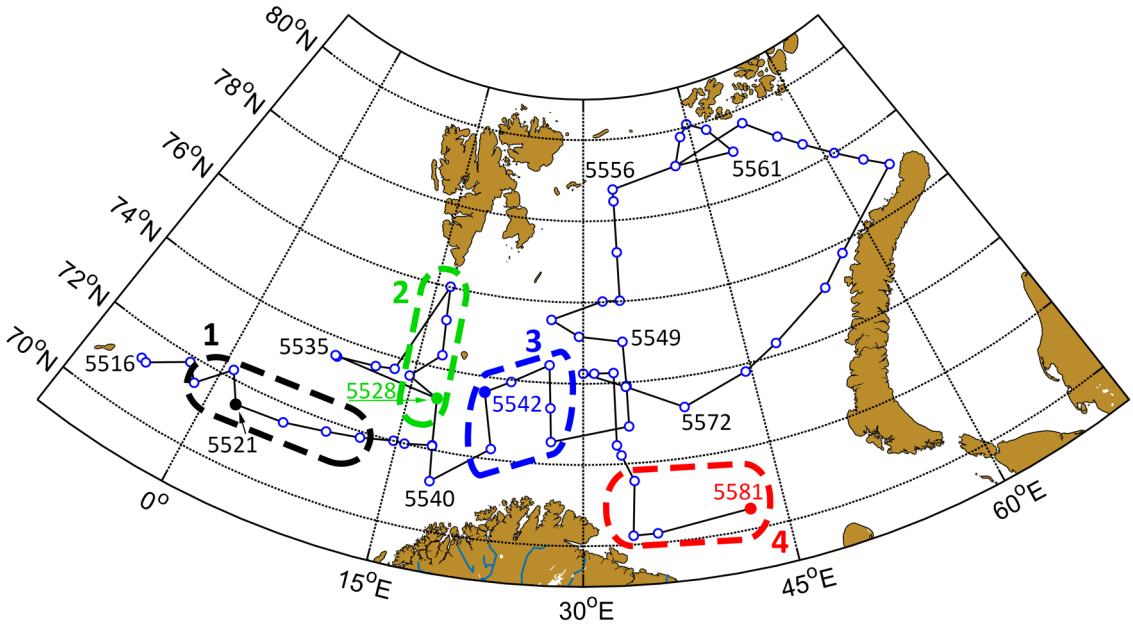

Рис. 1. Часть маршрута 68-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Баренцевом и Норвежском морях (19 июля – 16 августа 2017 г.). Синими кружками показаны станции, цветными пунктирными рамками выделены области с квазиоднородными для создания первичной продукции условиями (рис. 4, Таблица 1).

Материалы и методы

Для проведения судовых измерений использовался проточный измерительный комплекс, разработанный в Лаборатории оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова (Гольдин и др., 2015). Комплекс состоит из двухканального проточного флуориметра (ПФД-2), работающего на сверхъярких светодиодах, и термосалинографа Эксперт-002. Комплекс обеспечивает непрерывные измерения интенсивностей флуоресценции (I_{fl}) окрашенного растворенного органического вещества (ОРОВ) и хлорофилла «а» (Хл) в поверхностном слое вод вдоль маршрута судна, а также солености морской воды (S) и температуры (T).

В ПФД-2 I_{fl} измеряются в фиксированных спектральных диапазонах, которые включают максимумы полос флуоресценции. В качестве источников возбуждения в ПФД-2 используются сверхъяркие светодиоды (373 нм и 521 нм для каналов ОРОВ и Хл, соответственно), работающие в непрерывном режиме. Для регистрации флуоресцентного излучения используются ФЭУ-147-1. Диапазоны регистрации излучения формируются с помощью цветных стеклянных фильтров (максимумы пропускания – 480 нм и 685 нм для каналов ОРОВ и Хл, соответственно). Прибор

обеспечивает измерения I_{fl} в относительных единицах (о.е.). Интервал усреднения данных составлял 15 с. Относительная погрешность измерения I_{fl} составила <1%. Погрешность определения солености не превышала 0,25 епс, температуры – 0,12 °С. Калибровка термосалинографа была скорректирована по данным измерений CTD зонда на станциях.

Водозаборная система обеспечивала поступление морской воды с глубины 1–2 метра. В канале подачи забортной воды в проточную систему использовалась специальная камера для отделения воздушных пузырьков. Из-за непостоянства крена судна и качки могут возникать относительно небольшие изменения глубины водозабора. Однако это не влияет на результаты измерений, так как в районе исследований верхние метры вод обычно однородны (Not et al., 2005).

Спектры флуоресценции пигментов фитопланктона и ОРОВ измерялись на пробах морской воды с помощью двухканального лазерного спектрометра ЛС-2 (Гольдин и др., 2015) и светодиодного спектрофлуориметра СДСФ-1 (Глуховец и др., 2017б). Длины волн возбуждения флуоресценции: 401 нм, 532 нм и 595 нм. Интенсивности флуоресценции хлорофилла «а» нормированы на величину комбинационного рассеяния на молекулах воды и приведены в Рамановских единицах (R.U.). Возбуждение флуоресценции каждой из используемых длин волн имеет свои преимущества. Оранжевый канал имеет наибольшую чувствительность, а также наилучшим образом подходит для исследования цианобактерий. Синий диапазон хорошо поглощается и ОРОВ и Хл, но как раз влияние полосы ОРОВ на полосу КР может негативно повлиять на результаты измерений интенсивности флуоресценции Хл. Зеленый канал удобен для исследования флуоресценции Хл из-за близости полосы его флуоресценции к пику КР (что важно для процедуры нормировки), но он плохо подходит для исследования цианобактерий (Глуховец и Гольдин, 2018). В районе работ цветения цианобактерий зарегистрировано не было.

Спектры поглощения желтого вещества $a_g(\lambda)$ рассчитывались по данным портативного спектрофотометра с интегрирующей сферой ICAM (Integrated Cavity Absorption Meter), созданного на кафедре биофизики биологического факультета МГУ (Погосян и др., 2009). Абсолютные значения $a_g(\lambda)$ получены с использованием метода, разработанного в Лаборатории оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова (Глуховец и др., 2017а). Для получения спектров поглощения желтого вещества пробы морской воды фильтровались через ядерные фильтры с размером пор 0,4 мкм.

Определение концентрации хлорофилла в пробах морской воды, отобранных на станциях (рис. 1), производилось спектрофотометрическим методом (Jeffrey, Humphrey, 1975).

В работе использованы значения концентрации хлорофилла (*Chl*), рассчитанные по данным сканера цвета Ocean and Land Color Instrument (OLCI), с помощью стандартных алгоритмов: полуаналитического OC4Me (Morel et al., 2007) и основанного на нейронных сетях (https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-3-olci/level-2/imt-neural-net).

Спутниковые данные OLCI уровня L2 находятся в открытом доступе на сайте EUMETSAT (https://codarep.eumetsat.int). Значения для сравнения с судовыми данными были получены путем усреднения данных уровня L2 по сетке с ячейками 3×3 пикселя. Обработка спутниковых данных выполнена в среде Matlab.

Для построения распределений морского льда использовались ежедневные данные интерактивной мультисенсорной системы картирования снега и льда IMS Национального ледового центра (https://nsidc.org/data/G02156). Разрешение данных – 4 км.

Для подготовки рисунков 1, 3 и 5 использовалось расширение M_Map для Matlab (Pawlowicz, 2000). Распределения на рис. 2 построены с помощью программы ODV (Schlitzer, 2017).

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны пространственные распределения температуры, солености и интенсивностей флуоресценции ОРОВ и Хл «а» в поверхностном слое воды, полученные с помощью проточного измерительного комплекса. В приведенных распределениях T теплые тона соответствуют атлантическим водам, холодные – арктическим. Разрывы соответствуют участкам, на которых работы временно прерывались из-за штормовой погоды. Результаты измерений подтверждают, что Норвежское море подвержено влиянию теплых (T = 8–10°C) соленых (S > 35 епс) атлантических вод, переносимых Норвежским течением. Воды этого течения также проникают в Баренцево море, где они смешиваются с холодными (T = 0–4°C) арктическими водами с меньшей соленостью (S < 34,5 епс), поступающими с севера. На основании данных, полученных с помощью проточного измерительного комплекса, было определено положение Полярного фронта (ПФ), которое соответствует положению изотермы 3–4 °C (Parsons et al., 1996). Пересечения ПФ отмечены на рис. 2 черными штрихами. Измерения в области самопересечения маршрута (74°с.ш., 34°в.д.) выполнялись 1 и 12 августа 2017 г. Совпадение значений T, S, I_{fl} ОРОВ и Хл в этой точке указывает на относительную стабильность характеристик морской воды в этом районе в период измерений.

Пространственные распределения интенсивностей флуоресценции ОРОВ и Хл могут стать дополнительными индикаторами типов вод. В целом арктические воды характеризуются пониженными значениями I_{fl} Хл (рис. 2, внизу справа), что совпадает с результатами прямых определений его концентрации. В центральной части Баренцева моря по южную сторону Полярного фронта было зафиксировано увеличение значений I_{fl} ОРОВ с 1,0–1,1 о.е. (вне области цветения) до 1,2–1,3 о.е. (в области цветения) (рис. 2, слева внизу). Это увеличение находится в согласии с результатами абсорбционных измерений. Значения показателя поглощения желтого вещества $a_g(400)$ на станциях 5521, 5528 и 5542 (вне области цветения) не превышали 0,05 м$^{-1}$, в то время как на станциях 5580 и 5581 (где наблюдалось наиболее интенсивное цветение) значения $a_g(400)$ достигали 0,115 м$^{-1}$ и 0,077 м$^{-1}$, соответственно.

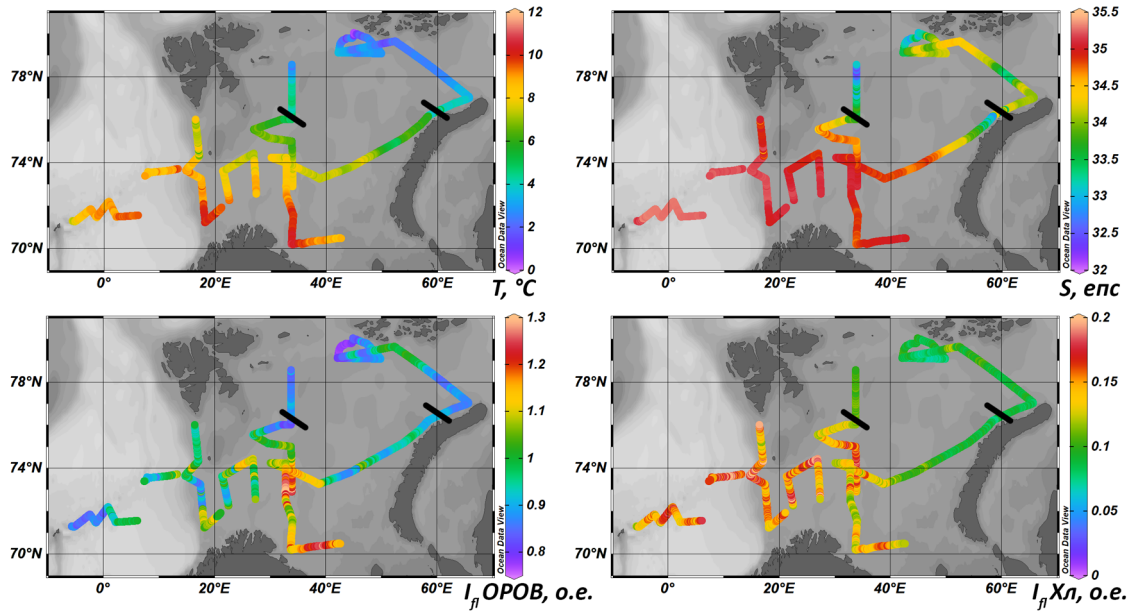

Рис. 2. Пространственные распределения температуры (вверху слева), солености (вверху справа) и интенсивностей флуоресценции ОРОВ (внизу слева) и Хл (внизу справа) в поверхностном слое вод. Интенсивности флуоресценции приведены в относительных единицах. Черными штрихами отмечены пересечения Полярного фронта. 19 июля – 16 августа 2017 г.

Следует обратить внимание на особенность участка разреза, выполненного вблизи Земли Франца-Иосифа (весь массив данных к северу от 78°с.ш. и к востоку от 40°в.д.). Здесь наблюдается положительная корреляция между S и I_{fl} ОРОВ (r = 0,83). На остальных участках маршрута связи между соленостью и флуоресценцией желтого вещества зарегистрировано не было. Ранее положительная корреляция была обнаружена у берегов Новой Земли, где она возникала из-за влияния талых ледниковых вод (Glukhovets, Goldin, 2018). Талые воды пресные и в них содержится меньше ОРОВ (Дроздова и др., 2017). Площадь ледников Земли Франца-Иосифа составляет 12,7 тыс. км^2, что сопоставимо с площадью ледников Новой Земли – 22,1 тыс. км^2 (Moholdt et al., 2012). Их летнее таяние приводит к поступлению талых ледниковых вод в поверхностный слой северо-восточной части Баренцева моря.

Кроме таяния ледников влияние на поверхностный слой оказывает и таяние морского льда. Морской лед содержит меньше желтого вещества, чем морская вода: в работе (Amon, 2003) показано, что в соседнем Карском море при замерзании морской воды содержание ОРОВ во льду становится меньше на 50–70 %. Приведенные на рис. 3 карты пространственного распределения морского льда за 5 июля (за месяц до судовых измерений) и 5 августа (время проведения судовых измерений), построенные по данным IMS, показывают значительное сокращение площади морского льда вблизи Земли Франца-Иосифа, что говорит об активном таянии морского льда в период судовых измерений. Таким образом положительная корреляция между I_{fl} ОРОВ и S вблизи Земли Франца-Иосифа обусловлена влиянием талых вод – поступающих с архипелага ледниковых и морского льда.

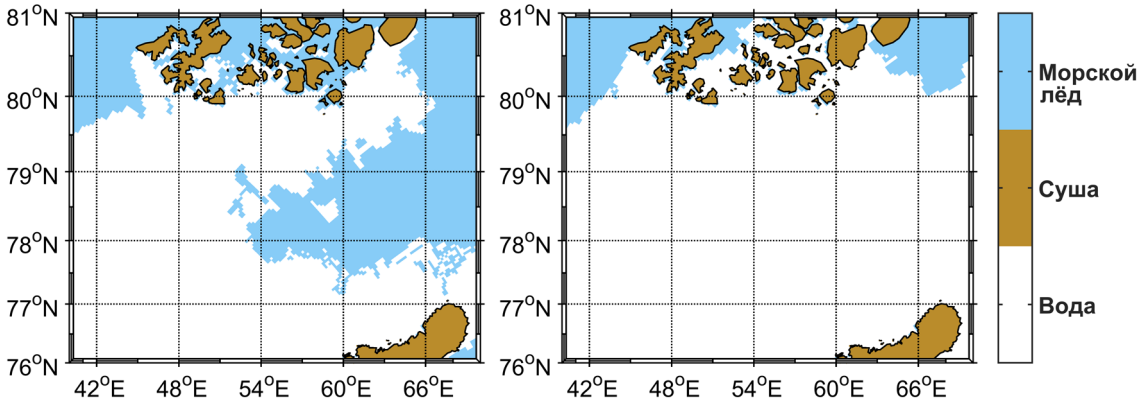

Рис. 3. Пространственные распределения морского льда в северо-восточной части Баренцева моря за 5 июля (слева) и 5 августа (справа) 2017 г., построенные по данным IMS. Разрешение 4 км.

Величина интенсивности флуоресценции хлорофилла может быть использована для оценки продуктивности вод. Однако I_{fl} Хл связана с его концентрацией неоднозначно (Карабашев, 1987). Эта связь зависит от условий создания первичной продукции: видового состава фитопланктона, физиологического состояния клеток, возраста популяции и адаптации водорослей к внешним условиям: световому режиму и минеральному питанию (Babin, 2008; Falkowski and Raven, 2007). При квазиоднородности этих условий соотношение между I_{fl} Хл позволяет оценивать его концентрацию. В исследованных районах выявлены четыре области, где линейные зависимости I_{fl} Хл от его концентрации ($Chl = K \times I_{fl}$) характеризуются высокими значениями коэффициентов детерминации. Эти области выделены цветными пунктирными рамками на рис. 1. На рис. 4 показаны диаграммы рассеяния интенсивности флуоресценции и концентрации Хл для длин волн возбуждения 401 нм (а), 532 нм (б) и 595 нм (в). Для построения рисунка использовались данные, полученные в верхнем стометровом слое на всех горизонтах станций, где выполнялся отбор проб морской воды. Значения коэффициентов регрессии K и коэффициентов детерминации R^2 для связей интенсивностей флуоресценции Хл с его концентрацией приведены в Таблице 1. Следует отметить, что для всех длин волн возбуждения сохраняется последовательность величин коэффициентов регрессии: наименьший для области 1, затем для областей 3 и 2 и наибольший для области 4. Полученные коэффициенты позволяли с большей точностью производить экспресс-оценку концентрации Хл в выделенных областях по данным флуоресцентных измерений в период проведения работ.

Наибольшие коэффициенты уравнения регрессии между I_{fl} Хл и его концентрацией были получены в Баренцевом море в области 4 (Таблица 1). Наибольшие значения коэффициентов означают, что для данной концентрации Хл интенсивность его флуоресценции в этой области меньше, чем в других. Станции 5578–5581 были выполнены в дневное время, во время измерений небо было свободно от облаков. Уменьшение I_{fl} может быть связано с механизмом нефотохимического тушения (Воронова и др., 2009), вызванным повышенной интенсивностью света в солнечную погоду.

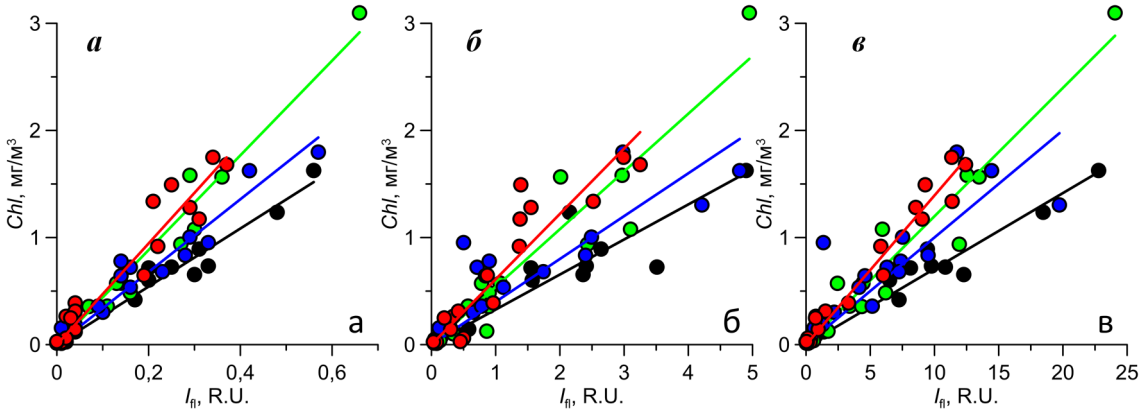

Рис. 4. Диаграммы рассеяния интенсивности флуоресценции хлорофилла и его концентрации для выбранных областей (рис. 1): (а) – длина волны возбуждения 401 нм, (б) – 532 нм, (в) – 595 нм. Цветом обозначены области (рис. 1): черным – 1, зеленым – 2, синим – 3, красным – 4.

Таблица 1. Значения коэффициентов регрессии *K* и коэффициентов детерминации R^2 для связей интенсивностей флуоресценции Хл с его концентрацией для трех длин волн возбуждения

Области	Станции	401 нм		532 нм		595 нм	
		K	R^2	*K*	R^2	*K*	R^2
1	5519–5524	2,7	0,96	0,33	0,90	0,07	0,95
2	5528–5532	4,4	0,97	0,53	0,89	0,12	0,94
3	5541–5546	3,4	0,93	0,40	0,65	0,10	0,64
4	5578–5581	4,7	0,92	0,61	0,85	0,14	0,96

Из-за частой сплошной облачности над исследуемыми акваториями летом 2017 г. количество доступных данных спутниковых сканеров цвета приемлемого качества и с минимально возможным временным интервалом с судовыми измерениями было весьма ограниченным: найдено всего несколько подходящих изображений OLCI. Наиболее показательное из них относится к области кокколитофоридного цветения в Баренцевом море, полученное 14 августа в 9 часов GMT. На рис. 5 показано пространственное распределение концентрации хлорофилла «а» по результатам стандартного алгоритма OC4Me. Закрытые облаками области, где спутниковые данные отсутствуют, показаны белым. Непрерывные судовые измерения в области кокколитофоридного цветения проводились 14–15 августа (маршрут показан на рис. 5 черной линией).

На рис. 6 приведены распределения *Chl* по данным OLCI (алгоритм OC4Me) и интенсивности флуоресценции Хл (проточный измерительный комплекс) на части разреза, показанной на рис. 5. В целом, наблюдается хорошее совпадение положения границ области цветения, определенных по судовым и спутниковым данным. Различия амплитуд распределений связаны с изменчивостью связи

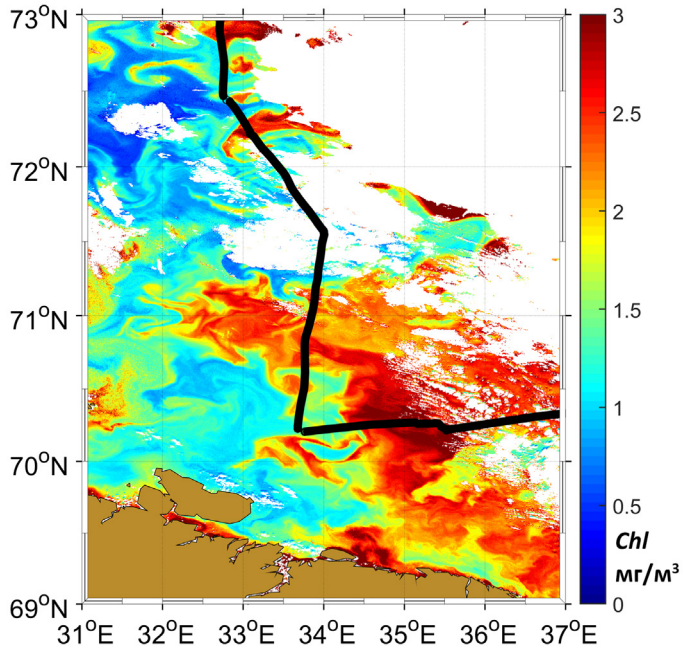

Рис. 5. Пространственное распределение концентрации хлорофилла «а» по данным OLCI (алгоритм OC4Me, 14 августа 2017 г.) и соответствующая часть маршрута (14–15 августа 2017 г.).

концентрации Хл и интенсивности его флуоресценции, с одной стороны, и с ошибками стандартных спутниковых алгоритмов в оптически сложных условиях кокколитофоридного цветения, с другой. Судовые измерения продолжались более суток, за это время под воздействием циркуляции вод и ветра границы цветения изменили свое положение. Этим объясняются невысокие значения коэффициентов детерминации при сравнении результатов судовых измерений с моментальным спутниковым изображением: $R^2 = 0{,}60$ для алгоритма OC4Me и $R^2 = 0{,}33$ для алгоритма, основанного на нейронных сетях.

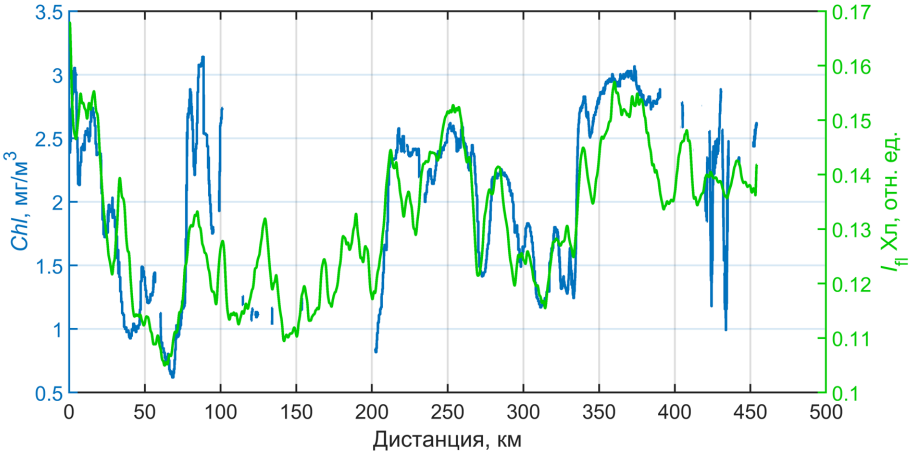

Рис. 6. Распределения концентрации Хл по данным OLCI (синяя линия) и интенсивности флуоресценции Хл (зеленая линия) вдоль разреза, показанного на рис. 5.

Выводы

Выполнено исследование биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева и Норвежского морей летом 2017 г. Полученные с помощью проточного измерительного комплекса распределения интенсивностей флуоресценции ОРОВ и Хл, а также температуры и солености морской воды, позволили выделить атлантические и арктические воды.

В северо-восточной части Баренцева моря вблизи Земли Франца-Иосифа в поверхностном слое вод была зарегистрирована область опреснения с положительной корреляцией интенсивности флуоресценции ОРОВ и солености. Это показывает, что опреснение вызвано влиянием талых вод – поступающих с архипелага ледниковых и морского льда. Аналогичное явление, также обусловленное талыми водами, было отмечено у заливов Новой Земли вблизи таящих ледников (Glukhovets, Goldin, 2019).

В исследованных районах выявлены четыре области (две в Норвежском и две в Баренцевом морях), где были зарегистрированы сильные линейные зависимости интенсивности флуоресценции Хл и его концентрации. Для различных длин волн возбуждения (401 нм, 532 нм, 595 нм) сохраняется последовательность величин коэффициентов регрессии, полученных в разных областях. Это демонстрирует возможность экспресс-оценки концентрации хлорофилла «а». Высокие значения коэффициентов регрессии, полученные в области, выделенной в южной части Баренцева моря, могут быть объяснены механизмом нефотохимического тушения флуоресценции Хл в солнечную погоду.

В области кокколитофоридного цветения в Баренцевом море зарегистрировано хорошее совпадение положения границ области цветения, определенных по судовым и спутниковым данным. В области цветения стандартные алгоритмы OLCI переоценивают значения концентрации Хл, при этом результаты регрессионного алгоритма OC4Me ближе к результатам прямых определений *Chl*, чем результаты алгоритма, основанного на нейронных сетях. Зарегистрировано увеличение интенсивности флуоресценции и значений показателя поглощения ОРОВ в области кокколитофоридного цветения в Баренцевом море.

Проведенное исследование, основанное на полученных летом 2017 г. данных, показало, что Баренцево и Норвежское моря – интересные и динамичные регионы, на биооптические характеристики которых воздействуют различные факторы. Поэтому влияние возможных климатических изменений должно проявиться в этих морях наиболее ярко. Будущие исследования необходимы для понимания сезонной и межгодовой изменчивости биооптических характеристик поверхностного слоя Баренцева и Норвежского морей.

Экспедиционные исследования и анализ судовых данных выполнены в рамках государственного задания (темы № 0149-2018-0002 и 0149-2019-0003) и гранта РНФ № 14-50-00095. Обработка и анализ спутниковых данных выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-35-00525. Гранты предоставлены через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автор выражает благодарность к.ф.-м.н. Ю.А. Гольдину за полезные советы и комментарии; к.т.н. Б.А. Гурееву за помощь в подготовке проточного измерительного комплекса; д.б.н. С.И. Погосяну (биологический факультет МГУ) за возможность использования измерителя поглощения ICAM; к.б.н. А.В. Лифанчук за данные прямых определений концентрации хлорофилла и В.О. Муравья за помощь при проведении измерений показателя поглощения.

Литература

Буренков В.И., Копелевич О.В., Ратькова Т.Н., Шеберстов С.В. Цветение кокколитофорид в Баренцевом море-спутниковые и судовые наблюдения // Океанология. 2011. Т. 51. № 5. С. 818–826.

Воронова Е.Н., Конюхов И.В., Казимирко Ю.В., Погосян С.И., Рубин А.Б. Изменения состояния фотосинтетического аппарата диатомовой водоросли Thallassiosira weisflogii при фотоадаптации и фотоповреждении // Физиология растений. 2009. Т. 56. № 6. С. 836–843.

Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Копелевич О.В., Зайцева А.Ф., Погосян С.И. Измерения показателя поглощения морской воды с помощью интегрирующей сферы // Светотехника. 2017а. № 5. С. 39–43.

Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А., Венцкут Ю.И. Светодиодный флуориметр со спектральной регистрацией // Труды I международной конференции «Современные проблемы термогидромеханики океана». 2017б. С. 42–45.

Глуховец Д.И., Гольдин Ю.А. Исследование флуоресценции хлорофилла «а» культур фитопланктона при различных длинах волн возбуждения // Процессы в геосредах. Т. 17. № 3. 2018. С. 60–61.

Глуховец Д.И., Копелевич О.В., Салинг И.В., Артемьев В.А., Паутова Л.А., Ланге Е.К., Кравчишина М.Д. Биооптические характеристики вод поверхностного слоя Балтийского, Норвежского и Баренцева морей по судовым и спутниковым данным летом 2014–2016 гг. // Океанология. 2017в. Т. 57. № 3. С. 454–463.

Гольдин Ю.А., Шатравин А.В., Левченко В.А., Венцкут Ю.И., Гуреев Б.А., Копелевич О.В. Исследования пространственной изменчивости интенсивности флуоресценции морской воды в западной части Черного моря // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 1. С. 17–26.

Дроздова А.Н., Пацаева С.В., Хунджуа Д.А. Флуоресценция растворенного органического вещества как маркер распространения пресных вод в Карском море и заливах архипелага Новая Земля // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 49–56.

Зимин А.В., Коник А.А., Атаджанова О.А. Количественные оценки изменчивости характеристик температуры поверхности моря в районе фронтальных зон Баренцева моря // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2018. № 51. С. 99–108.

Карабашев Г.С. Флюоресценция в океане // Гидрометеоиздат, 1987. – 200 с.

Копелевич О.В., Вазюля С.В., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Салинг И.В. Проникновение солнечной радиации видимого диапазона в воды Баренцева моря в зависимости от облачности и кокколитофоридных цветений // Океанология. 2017а. Т. 57. № 3. С. 445–453.

Копелевич О.В., Каралли П.Г., Лохов А.С., Салинг И.В., Шеберстов С.В. Перспективы улучшения точности оценки параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом

море по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017б. Т. 14. № 7. С. 267–279.

Погосян С.И., Дургарян А.М., Конюхов И.В., Чивкунова О.Б., Мерзляк М.Н. Абсорбционная спектроскопия микроводорослей, цианобактерий и растворенного органического вещества: измерения во внутренней полости интегрирующей сферы // Океанология. 2009. Т. 49. № 6. С. 934–939.

Amon R.M.W. The role of dissolved organic matter for the organic carbon cycle in the Arctic Ocean // The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Springer, Berlin. 2003. P. 83–99.

Babin M., Roesler C.S., Cullen J.J. Phytoplankton fluorescence: Theory, current literature and in situ measurement // Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and harmful algal blooms: Theory, instrumentation and modeling. Unesco, 2008. P. 237–280.

Chan F.T., Stanislawczyk K., Sneekes A.C., Dvoretsky A., Gollasch S., Minchin D., David M., Jelmert A., Albretsen J., Bailey S.A. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks // Global change biology. 2019. Vol. 25. No. 1. P. 25–38.

Falkowski P.G., Raven J.A. Aquatic photosynthesis: Second Edition // Princeton University Press, 2007. 488 p.

Glukhovets D.I., Goldin Yu.A. Surface layer desalination of the bays on the east coast of Novaya Zemlya identified by shipboard and satellite data // Oceanologia. 2019. Vol. 61. No. 1. P. 68–77.

Hancke K., Hovland E.K., Volent Z., Pettersen R., Johnsen G., Moline M., Sakshaug E. Optical properties of CDOM across the Polar Front in the Barents Sea: Origin, distribution and significance // Journal of Marine Systems. 2014. Vol. 130. P. 219–227.

Hovland E.K., Dierssen H.M., Ferreira A.S., Johnsen G. Dynamics regulating major trends in Barents Sea temperatures and subsequent effect on remotely sensed particulate inorganic carbon // Marine Ecology Progress Series. 2013. Vol. 484. P. 17–32.

Jeffrey S.T., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton // Biochemie und physiologie der pflanzen. 1975. Vol. 167. No. 2. P. 191–194.

Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2004. Vol. 51. No. 10–11. P. 1063–1091.

Loeng H., Drinkwater K. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability // Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. 2007. Vol. 54. No. 23–26. P. 2478–2500.

Moholdt G., Wouters B., Gardner A.S. Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic // Geophysical Research Letters. 2012. Vol. 39. No. 10. P. 1–5.

Morel A., Huot Y., Gentili B., Werdell P.J., Hooker S.B., Franz B.A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach // Remote Sensing of Environment. 2007. Vol. 111. No. 1. P. 69–88.

Not F., Massana R., Latasa M., Marie D., Colson C., Eikrem W., Pedrós-Alió C., Vaulot D., Simon N. Late summer community composition and abundance of photosynthetic picoeukaryotes in Norwegian and Barents Seas // Limnology and Oceanography. 2005. Vol. 50. No. 5. P. 1677–1686.

Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of

Arctic sea ice loss // Journal of Climate. 2018. Vol. 31. No. 12. P. 4917–4932.
Oziel L., Sirven J., Gascard J.C. The Barents Sea polar front and water masses variability (1980–2011) // Ocean Science Discussions. 2015. Vol. 12. No. 2. P. 449–492.
Parsons A.R., Bourke R.H., Muench R.D., Chiu C.S., Lynch J.F., Miller J.H., Plueddemann A.J., Pawlowicz R. The Barents Sea polar front in summer // Journal of Geophysical Research: Oceans. 1996. Vol. 101. No. C6. P. 14201–14221.
Pawlowicz R. M Map: A mapping package for Matlab. University of British Columbia Earth and Ocean Sciences // https://www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html. (2000).
Rost B., Riebesell B. Coccolithophores and the biological pump: responses to environmental changes // Coccolithophores. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. P. 99–125.
Schlitzer R. Ocean Data View, odv.awi.de. 2017.
Signorini S.R., McClain C.R. Environmental factors controlling the Barents Sea spring–summer phytoplankton blooms // Geophysical Research Letters. 2009. Vol. 36. No. 10.
Smyth T.J., Moore G.F., Groom S.B., Land P.E., Tyrrell T. Optical modeling and measurements of a coccolithophore bloom // Applied Optics. 2002. Vol. 41. No. 36. P. 7679–7688.

STUDY OF BIO-OPTICAL CHARACTERISTICS OF THE BARENTS AND NORWEGIAN SEAS SURFACE LAYER WATERS IN SUMMER 2017

Glukhovets D.I.[1, 2]

[1]*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,*
36 Nahimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia, e-mail: glukhovets@ocean.ru
[2]*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, 141701, Russia*
Submitted 29.12.2018, accepted 29.03.2019

A study of the surface layer bio-optical properties of the Barents and Norwegian Seas in the summer of 2017 is carried out. Ship data were obtained during the 68th cruise of the R/V ‘Akademik Mstislav Keldysh’ (June-August 2017). Using a flow-through system, the fluorescence intensities of chlorophyll ‘a’ and dissolved organic matter as well as the salinity and temperature of the water surface layer along the ship’s route were continuously recorded. Seawater samples were taken for spectral fluorescence and absorbance measurements performed with a laser spectrometer and an integrating cavity absorption meter. The results are compared with the data of direct determinations of the chlorophyll concentration. Frequent continuous cloudiness prevented the use of ocean color data for the Norwegian Sea. In the coccolithophore bloom area in the Barents Sea, the results of shipboard measurements are compared with the data of OLCI satellite scanner. In this area, standard OLCI algorithms overestimate chlorophyll concentration, while the regression algorithm works better than based on neural networks. Comparison of the fluorescence and absorption spectra has shown the possibility of carrying out a rapid assessment of the chlorophyll concentration using optical methods. The change in the coefficients of the regression equations of chlorophyll fluorescence intensity and its concentration, determined by direct methods for different regions, is shown.

Keywords: bio-optical characteristics, surface layer, yellow substance, chlorophyll, fluorescence, Barents Sea, Norwegian Sea

References

Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Rat'kova T.N., and Sheberstov S.V. Satellite observations of the coccolithophorid bloom in the Barents Sea. *Oceanology*, 2011, Vol. 51, No. 5, pp. 766–774.

Voronova E.N., Konyukhov I.V., Kazimirko Y.V., Pogosyan S.I., and Rubin A.B. Changes in the condition of photosynthetic apparatus of a diatom alga Thallassiosira weisflogii during photoadaptation and photodamage. *Russian journal of plant physiology*, 2009, Vol. 56, No. 6, pp. 753–760.

Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Kopelevich O.V., Zaytseva A.F., and Pogosyan S.I. Measuring the sea water absorption factor using integrating sphere. *Light & Engineering*, 2018, Vol. 26, No. 1, pp. 120–126.

Glukhovets D.I., Goldin Yu.A., Gureev B.A., and Ventskut Y.I. Svetodiodnyj fluorimetr so spektral'noj registraciej (LED fluorimeter with spectral registration). *Trudy I mezhdunarodnoj konferencii "Sovremennye problemy termogidromekhaniki okeana"*, 2017a, pp. 42–45.

Glukhovets D.I. and Goldin Yu.A. Issledovanie fluorescencii hlorofilla «a» kul'tur fitoplanktona pri razlichnyh dlinah voln vozbuzhdenija (Study of chlorophyll 'a' fluorescence of phytoplankton cultures using different excitation wavelengths). Processy v geosredah. 2018, Vol. 17, No. 3, pp. 60–61.

Glukhovets D.I., Kopelevich O.V., Sahling I.V., Artemiev V.A., Pautova L.A., Lange E.K., and Kravchishina M.D. Biooptical characteristics of the surface layer of the Baltic, Norwegian, and Barents seas in summer 2014–2016 from shipboard and satellite data. *Oceanology*, 2017b, Vol. 57, No. 3, pp. 410–418.

Goldin Yu.A., Shatravin A.V., Levchenko V.A., Ventskut Y.I., Gureev B.A., and Kopelevich O.V. Issledovanie prostranstvennoi izmenchivosti intensivnosti fluorestsentsii morskoi vody v zapadnoi chasti Chernogo morya (Analysis of spatial variability of fluorescent intensity of seawater in western part of the Black Sea). *Fundam. Prikl. Gidrofiz.,* 2015, Vol. 8, No. 1, pp. 17–26.

Drozdova A.N., Patsaeva S.V., and Khundzhua D.A. Fluorescence of dissolved organic matter as a marker for distribution of desalinated waters in the Kara Sea and bays of Novaya Zemlya archipelago. *Oceanology*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 41–47.

Karabashev G.S. Fluorescence in the ocean: Doctoral dissertation, Monterey Institute of International Studies, 1990, 200 p.

Kopelevich O.V., Vazyulya S.V., Grigoriev A.V., Khrapko A.N., Sheberstov S.V., and Sahling I.V. Penetration of visible solar radiation in waters of the Barents Sea depending on cloudiness and coccolithophore blooms. *Oceanology*, 2017a, Vol. 57, No. 3, pp. 402–409.

Kopelevich O.V., Karalli P.G., Lokhov A.S., Sahling I.V., and Sheberstov S.V. Perspektivy uluchshenija tochnosti ocenki parametrov kokkolitoforidnyh cvetenij v Barencevom more po sputnikovym dannym (Prospects for improving the accuracy of estimates of the parameters of coccolithophoride blooms in the Barents Sea from satellite data). *Sovr. Probl. DZZ Kosm*., 2017b, Vol. 14, No. 7, pp. 267–279.

Pogosyan S.I., Durgaryan A.M., Konyukhov I.V., Chivkunova O.B., and Merzlyak M.N. Absorption spectroscopy of microalgae, cyanobacteria, and dissolved organic matter: Measurements in an integrating sphere cavity. *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 6, pp. 866–871.

Amon R.M.W. The role of dissolved organic matter for the organic carbon cycle in the Arctic Ocean. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2003, pp. 83–99.

Babin M., Roesler C.S., and Cullen J.J. Phytoplankton fluorescence: Theory, current literature

and in situ measurement. Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and harmful algal blooms: Theory, instrumentation and modeling. Unesco, 2008, pp. 237–280.

Chan F.T., Stanislawczyk K., Sneekes A.C., Dvoretsky A., Gollasch S., Minchin D., David M., Jelmert A., Albretsen J., and Bailey S.A. Climate change opens new frontiers for marine species in the Arctic: Current trends and future invasion risks. *Global change biology*, 2019, Vol. 25, No. 1, pp. 25–38.

Falkowski P.G. and Raven J.A. Aquatic photosynthesis: Second Edition. Princeton University Press, 2007, 488 p.

Glukhovets D.I. and Goldin Yu.A. Surface layer desalination of the bays on the east coast of Novaya Zemlya identified by shipboard and satellite data. *Oceanologia*, 2019, Vol. 61, No. 1, pp. 68–77.

Hancke K., Hovland E.K., Volent Z., Pettersen R., Johnsen G., Moline M., and Sakshaug E. Optical properties of CDOM across the Polar Front in the Barents Sea: Origin, distribution and significance. *Journal of Marine Systems*, 2014, Vol. 130, pp. 219–227.

Hovland E.K., Dierssen H.M., Ferreira A.S., and. Johnsen G. Dynamics regulating major trends in Barents Sea temperatures and subsequent effect on remotely sensed particulate inorganic carbon. *Marine Ecology Progress Series*, 2013, Vol. 484, pp. 17–32.

Jeffrey S.T. and Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochemie und physiologie der pflanzen*, 1975, Vol. 167, No. 2, pp. 191–194.

Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Ershova S.V., Sheberstov S.V., and Evdoshenko M.A. Application of SeaWiFS data for studying variability of bio-optical characteristics in the Barents, Black and Caspian Seas. Deep Sea Research Part II: *Topical Studies in Oceanography*, 2004, Vol. 51, No. 10–11, pp. 1063–1091.

Loeng H. and Drinkwater K. An overview of the ecosystems of the Barents and Norwegian Seas and their response to climate variability. Deep Sea Research Part II: *Topical Studies in Oceanography*, 2007, Vol. 54, No. 23–26, pp. 2478–2500.

Moholdt G., Wouters B., and Gardner A.S. Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic. *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, No. 10, pp. 1–5.

Morel A., Huot Y., Gentili B., Werdell P.J., Hooker S.B., and Franz B.A. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 2007, Vol. 111, No. 1, pp. 69–88.

Not F., Massana R., Latasa M., Marie D., Colson C., Eikrem W., Pedrós-Alió C., Vaulot D., and Simon N. Late summer community composition and abundance of photosynthetic picoeukaryotes in Norwegian and Barents Seas. *Limnology and Oceanography*, 2005, Vol. 50, No. 5, pp. 1677–1686.

Onarheim I.H., Eldevik T., Smedsrud L.H., and Stroeve J.C. Seasonal and regional manifestation of Arctic sea ice loss. Journal of Climate, 2018, Vol. 31, No. 12, pp. 4917–4932.

Oziel L., Sirven J., and Gascard J.C. The Barents Sea polar front and water masses variability (1980-2011). *Ocean Science Discussions*, 2015, Vol. 12, No. 2, pp. 449–492.

Parsons A.R., Bourke R.H., Muench R.D., Chiu C.S., Lynch J.F., Miller J.H., Plueddemann A.J., and Pawlowicz R. The Barents Sea polar front in summer. *Journal of Geophysical Research: Oceans,* 1996, Vol. 101, No. C6, pp. 14201–14221.

Pawlowicz R. M_Map: A mapping package for Matlab. University of British Columbia Earth and Ocean Sciences. https://www.eoas.ubc.ca/~rich/map.html. (2000).

Rost B. and Riebesell B. Coccolithophores and the biological pump: responses to environmental changes. Coccolithophores, Berlin, Heidelberg: Springer, 2004, pp. 99–125.

Schlitzer R. Ocean Data View, odv.awi.de, 2017.

Signorini S.R. and McClain C.R. Environmental factors controlling the Barents Sea spring–summer phytoplankton blooms. *Geophysical Research Letters*, 2009, Vol. 36, No. 10.

Smyth T.J., Moore G.F., Groom S.B., Land P.E., and Tyrrell T. Optical modeling and measurements of a coccolithophore bloom. *Applied Optics*, 2002, Vol. 41, No. 36, pp. 7679–7688.

Zimin A.V., Konik A.A., and Atadzhanova O.A. Kolichestvennye ocenki izmenchivosti harakteristik temperatury poverhnosti morja v rajone frontal'nyh zon Barenceva morja (Quantitative estimations of the variability of characteristics of the temperature of the sea (SST) surface in the front of the frontal zone of the Barents sea). Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta, 2018, No. 51, pp. 99–108.