

ГЛАВА 5. ГИДРООПТИКА

В этой главе представлены результаты современных оптических исследований в Баренцевом море. Хотя Баренцево море на протяжении XIX и XX веков было наиболее изучаемым районом Арктики, оптические измерения в проводимых экспедициях занимали незначительное место. Современные оптические исследования начались в Баренцевом море после запуска спутниковых сканеров цвета, когда программы экспедиций стали включать комплексные подспутниковые измерения для валидации спутниковых алгоритмов оценки биооптических параметров поверхностного слоя. Появившийся термин «биооптические параметры» включает в себя оптические и биологические характеристики (в первую очередь, концентрацию хлорофилла), которые определяются по данным спутниковых сканеров цвета. Одними из первых такие исследования были выполнены на судне ИО РАН «Академик Сергей Вавилов» в 13 и 14 рейсах в августе–сентябре 1998 г. Но первая работа, в которой использовались данные судовых и спутниковых биооптических измерений для исследования экосистемы Баренцева моря, была опублико-

вана еще в 1991 г. [Mitchell et al., 1991]. Для анализа использовались данные сканера цвета CZCS (Coastal Zone Color Scanner) с 1978 по 1986 гг. (были отобраны наиболее качественные данные) и судовые данные биооптических и гидрофизических исследований, выполненных в мае–июне 1987 г.

Результаты оценки биооптических характеристик вод Баренцева моря по данным спутниковых сканеров цвета за период 1998–2017 гг. представлены в монографии [Копелевич и др., 2018], которая включает также Атлас биооптических характеристик на электронном носителе (материалы также доступны на сайте <http://optics.ocean.ru>). Из последних зарубежных публикаций укажем работы [Giraudeau et al., 2016; Hovland et al., 2014; Signorini, McClain, 2009].

Материал, представленный в этой главе, разделен на два раздела:

5.1. Биооптические характеристики и солнечная радиация в поверхностном слое Баренцева моря (Копелевич О.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Салинг И.В.);

5.2. Вертикальная структура водной толщи по оптическим данным (Буренков В.И., Артемьев В.А.).

5.1. Биооптические характеристики и солнечная радиация в поверхностном слое Баренцева моря

О.В. Копелевич, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец, И.В. Салинг

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Представлены данные расчета биооптических параметров в Баренцевом море, для которых были разработаны региональные алгоритмы. Эти алгоритмы были выведены на основе данных натурных измерений, выполненных в рассматриваемом регионе. Изучены сезонная и межгодовая изменчивости биооптических характеристик и дана оценка кокколитофоридных цветений в Баренцевом море.

Ключевые слова: биооптические параметры, спутниковые наблюдения, солнечная радиация, кокколитофоридное цветение.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(18)

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Судовые измерения. Для проведения натурных измерений использовался судовой аппаратный комплекс, включающий измерители спектральной яркости восходящего излучения и спектральной облученности поверхности моря, светового режима на поверхности и в водной толще, вертикального распределения показателя ослабления света и температуры в зондирующем режиме, лазерный и диодный спектрометры, спектрофотометр для измерения

спектров показателя поглощения морской воды, двухканальный проточный флуориметр для непрерывных измерений на ходу судна интенсивностей флуоресценции хлорофилла и окрашенного растворенного органического вещества, стандартный белый диск для измерения относительной прозрачности морской воды [Копелевич и др., 2018].

Спутниковые наблюдения. Биооптические параметры, представленные в Атласе, рассчитаны по данным сканера SeaWiFS (январь 1998 г. – июнь 2002 г.) и

MODIS-Aqua (июль 2002 г. – декабрь 2017 г.); данные других сканеров использовались в отдельных случаях для разработки и валидации алгоритмов.

Большая часть акватории Баренцева моря относится к водам второго типа [Morel, Prier, 1977; Morel et al., 2006], для которых стандартные алгоритмы обработки спутниковых данных НАСА (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>) могут давать большие ошибки, поэтому для расчета биооптических параметров в Баренцевом море использовались региональные алгоритмы. Эти алгоритмы были выведены на основе данных натурных измерений, выполненных в рассматриваемом регионе [Копелевич и др., 2018].

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

На рис. 5.1.1 показаны среднемесячные пространственные распределения концентрации хлорофилла (Chl), показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} и температуры поверхности моря ТПМ в Баренцевом море по данным спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua, осредненным за период 1998–2011 гг. (ТПМ – за 2003–2011 гг.).

в Баренцевом море по данным спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua, осредненным за период 1998–2011 гг. (ТПМ – за 2003–2011 гг.). Эти месяцы взяты как наиболее яркие с точки зрения пространственной изменчивости рассматриваемых параметров: в мае наблюдается весеннее цветение диатомовых водорослей, в августе – кокколитофоридное цветение (КЦ) [Signorini, McClain, 2009].

Как видно из рис. 5.1.1, цветения двух вышеуказанных видов фитопланктона приводят к существенно различным распределениям концентрации хлорофилла и показателя b_{bp} (этот показатель количественно характеризует концентрацию взвешенных частиц и клеток кокколитофид в период КЦ). Весеннее цветение диатомовых характеризуется заметным увеличением концентрации хлорофилла и охватывает практически все море (вплоть до 80° с. ш.), но приводит к заметному увеличению значений b_{bp} только при значениях концентрации Chl больше 0.4 мг/м³.

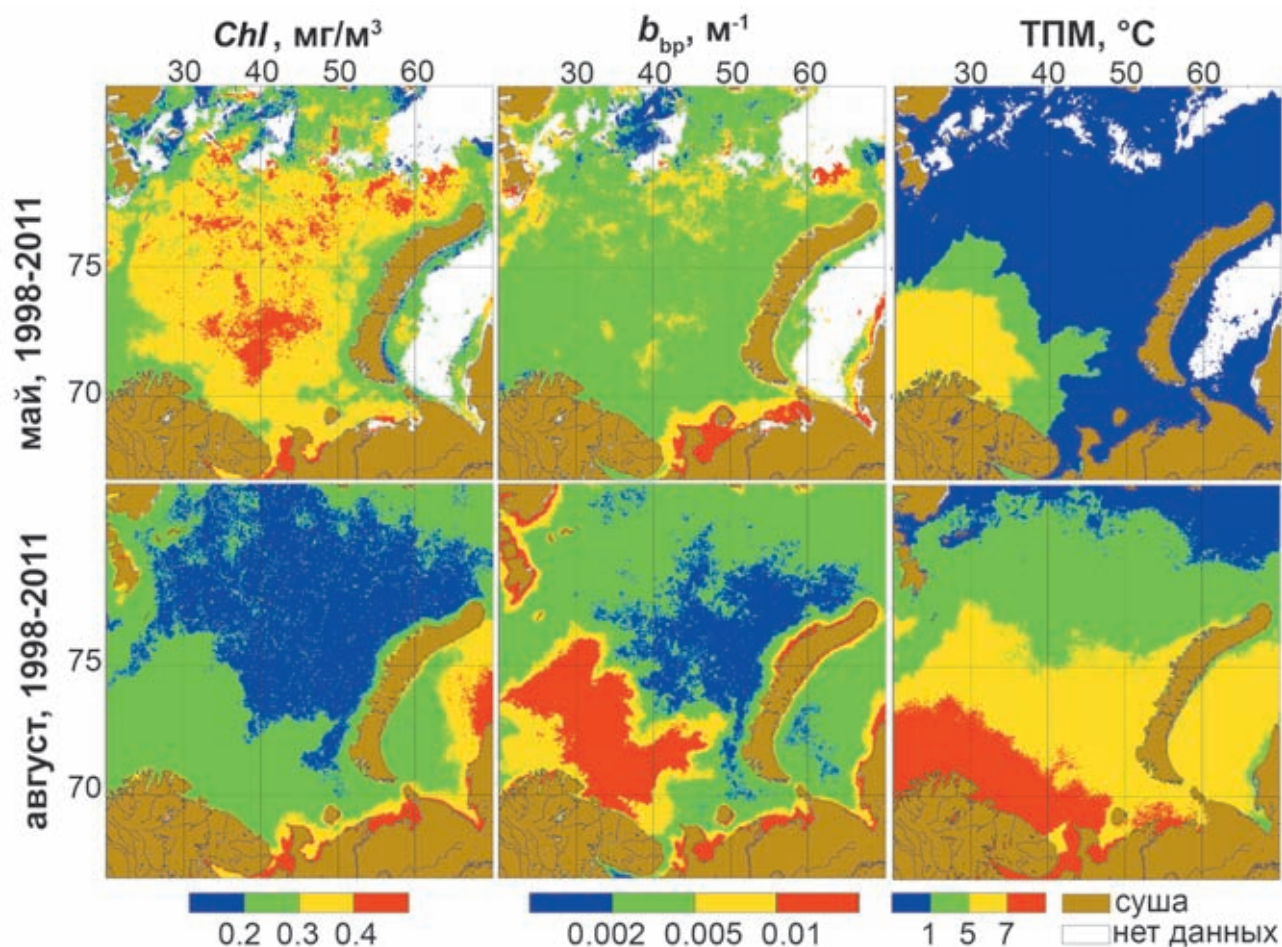


Рис. 5.1.1. «Среднеклиматические» пространственные распределения (слева направо) концентрации хлорофилла- a , показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} и температуры поверхности моря ТПМ в Баренцевом море по данным спутниковых сканеров SeaWiFS и MODIS-Aqua, осредненным за период 1998–2011 гг. (ТПМ – за 2003–2011 гг.). Верхний ряд – среднемесячные распределения для мая, нижний – для августа

Кокколитофоридные цветения, наоборот, ярко проявляются в распределении значений b_{bp} и относительно слабо в распределении Chl ; значения 0.25–0.3 мг/м³ достигаются при b_{bp} больше 0.015 м⁻¹, что примерно соответствует концентрации клеток кокколитофорид порядка 2 млн кл/л [Копелевич и др., 2017б].

Важнейший фактор, определяющий пространственное распределение биооптических характеристик в Баренцевом море, – поступление с запада в виде поверхностных течений относительно теплых и соленых атлантических вод [Girardeau et al., 2016]. Навстречу им с севера и северо-востока поступают более холодные и менее соленые арктические воды. Граница между ними – Полярный фронт, который хорошо виден на пространственном распределении ТПМ на рис. 5.1.1. В мае за эту границу можно условно принять изотерму 3°C, в августе – 7°C. Как видно, в августе этой границе хорошо соответствуют и распределения Chl и показателя b_{bp} , обусловленные в августе КЦ [Burenkov et al., 2011; Signorini, McClain, 2009].

В мае и августе на пространственном распределении показателя b_{bp} хорошо видно помутнение в юго-восточной части моря, обусловленное стоком Печоры (см. раздел 5.2). В мае можно также заметить менее значительное помутнение на севере моря, связанное с таянием ледяного покрова (рис. 5.1.1).

СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ

Реальное покрытие акватории Баренцева моря спутниковыми данными дает возможность оценить сезонную и межгодовую изменчивость с достаточной степенью надежности только для теплого сезона (май–сентябрь). Учитывая неоднородность пространственного распределения биооптических характеристик, показанную в предыдущем разделе, анализ изменчивости проводился отдельно для трех выделенных субрегионов: Северного (к северу от 75° с. ш.), Среднего – между Северным и Южным субрегионами (последний включает залив Чешская Губа и Печорское море, находящееся под сильным влиянием стока реки Печоры). Это сильно упрощенное районирование было принято исходя из различия лишь основных условий, определяющих формирование биооптических характеристик вод поверхностного слоя [Копелевич и др., 2018].

На рис. 5.1.2 приведены диаграммы изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла Chl и показателя b_{bp} для Северного и Среднего субрегионов за период 1998–2018 гг. Как видно из рисунка, различия между этими параметрами, отмеченные в предыдущем разделе для пространственных распределений, проявляются также для сезонной и межгодовой изменчивости. Для Chl в

обоих субрегионах наблюдаются весенний (в мае) и осенний (сентябрь) максимумы, причем первый из них во все годы значительно ярче второго, который в Северном субрегионе в некоторые годы вообще не проявляется. Различия между рассматриваемыми субрегионами только количественные – в частности, наиболее высокие значения Chl в Северном регионе (порядка 0.4 мг/м³) зарегистрированы в 2012 и 2016 гг., тогда как в Среднем – в 2011 г. (~0.43 мг/м³) и 2014 г. (~0.37 мг/м³).

Для показателя b_{bp} между субрегионами наблюдаются существенные различия. Также видны два максимума – весенний и осенний, но, в отличие от Chl , второй значительно ярче первого (как указывалось в предыдущем разделе, первый связан с цветением диатомовых, второй – кокколитофорид). В Среднем субрегионе, где в основном происходят КЦ, максимум во все годы, кроме 2000 г., наблюдается в августе, тогда как в Северном чаще в сентябре (исключение составили только 2003 г., когда осеннего максимума вообще не было, и 2006–2007 гг., когда он наблюдался в августе).

При сравнении с изменениями среднемесячных значений температуры поверхности моря ТПМ не обнаружено четкой связи с изменчивостью биооптических характеристик: в Северном регионе наиболее теплый 2015 г. не выделился ни по значениям Chl , ни b_{bp} , также как и самый теплый 2013 г. – в Среднем.

В таблице 5.1.1 представлены средние за сезон (май–сентябрь) значения концентрации хлорофилла (Chl) и показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} в разных субрегионах. Из существенных изменений можно отметить лишь увеличение среднего за сезон значения b_{bp} в Северном субрегионе в 2017–2018 гг. по сравнению со среднеклиматическим значением 1998–2011 гг. – более чем на 20% (как видно из рис. 5.1.2, за счет повышенных значений b_{bp} в июне–июле 2017 г.). Для концентрации хлорофилла увеличение средних за сезон значений в 2017–2018 гг. также наблюдается в Северном и Среднем субрегионах, но прирост составляет лишь 12%. Для Южного субрегиона изменения составляют лишь 3–5%.

КОККОЛИТОФОРИДНЫЕ ЦВЕТЕНИЯ

Кокколитофоридные цветения (КЦ) входят в число климатически значимых факторов, так как оказывают влияние на баланс углекислого газа в системе атмосфера–океан и на тепловой баланс из-за изменения альbedo водной среды и объемного поглощения солнечной радиации. КЦ обеспечивают функционирование так называемого «карбонатного биологического насоса», связанного с образованием неорганических углеродных форм (кальцита) и последующим переносом кальцита на дно.

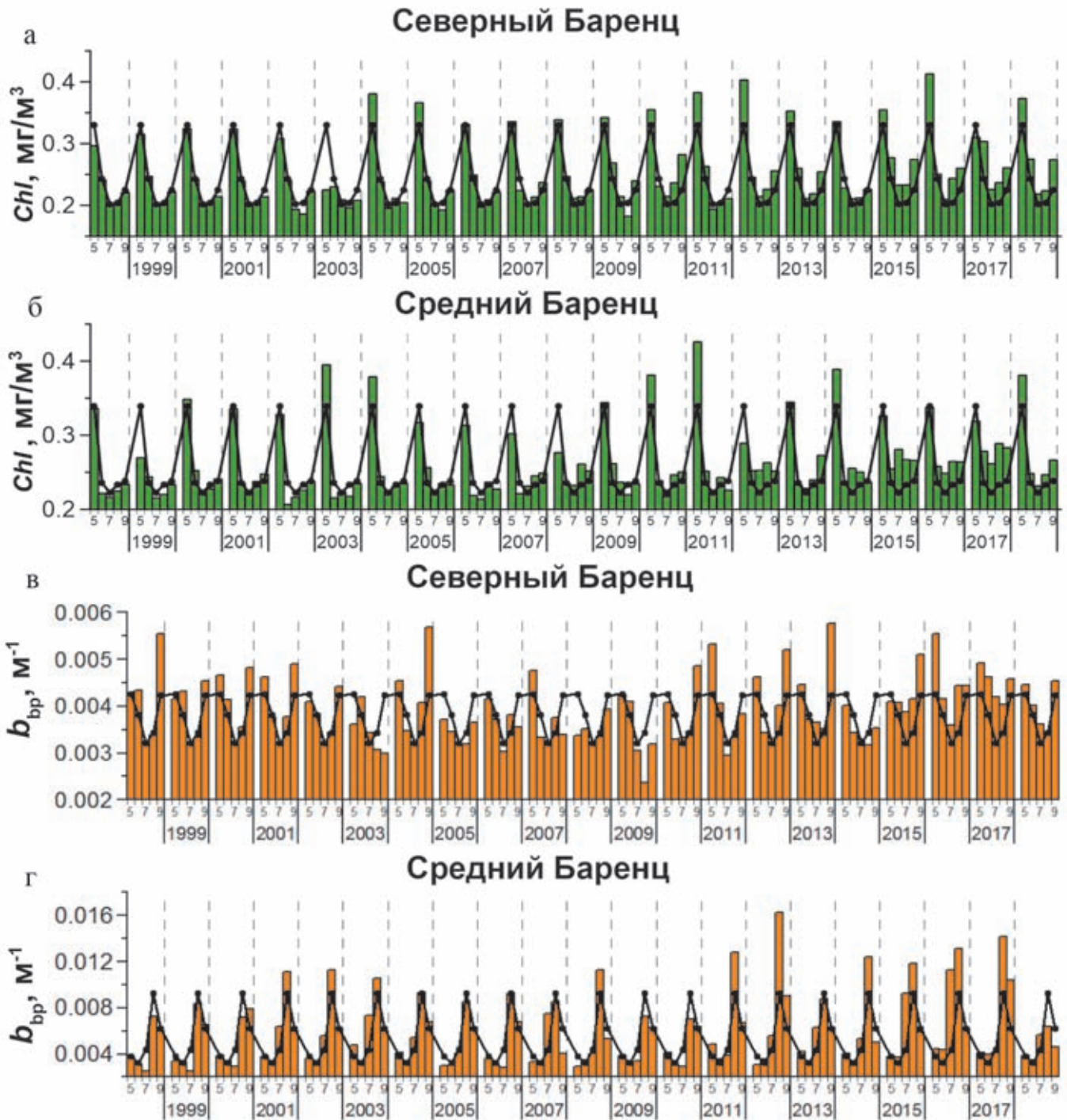


Рис. 5.1.2. Диаграммы изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла (а, б) и показателя рассеяния b_{bp} (в, г) для Северного (а, в) и Среднего (б, г) субрегионов за 1998–2018 гг. Черные кривые показывают изменения среднемесячных «климатических» значений (осредненных за период 1998–2011 гг.)

На рис. 5.1.3 показаны диаграммы изменения среднемесячных значений параметров кокколитофоридного цветения в Баренцевом море с 1998 по 2018 гг.: концентрации клеток N_{coc} (млн кл./л); общей площади цветения S (10^5 км²) и общего количества клеток кокколитофорид в метровом слое S (10^{20} кл./м³).

Как видно, цветения в августе могут охватывать площади более 0.3 млн км², а общее количество клеток в метровом слое достигать почти $6 \cdot 10^{20}$ клеток.

Благодаря сильному рассеянию света клетками кокколитофорид, покрытых чешуйками кальцита (*plated cells*) и отделившихся от них кокколитами, КЦ

хорошо видны со спутника при благоприятных условиях наблюдения в виде ярких пятен молочного цвета, занимающих огромные площади (рис. 5.1.4).

Как видно из рис. 5.1.3, цветения КЦ наблюдаются во все годы, но их интенсивность достаточно сильно варьирует. При сохранении благоприятных

условий наблюдения можно отследить динамику развития КЦ (рис. 5.1.5). Как видно из рисунка, начало цветения может наблюдаться уже во второй половине июня и продолжаться до середины сентября; максимум обычно наблюдается в первой половине августа.

Таблица 5.1.1. Средние за сезон (май–сентябрь) значения концентрации хлорофилла (Chl) и показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} в разных субрегионах Баренцева моря

Субрегион	Chl , мг/м ³			b_{bp} , 10 ³ , м ⁻¹		
	1998–2018 гг.	Средние за 1998–2011 гг.	2017–2018 гг.	1998–2018 гг.	Средние за 1998–2011 гг.	2017–2018 гг.
Северный	0.25	0.24	0.27	3.9	3.8	4.6
Средний	0.26	0.25	0.28	5.7	5.4	5.7
Южный	0.37	0.36	0.38	11.4	11.4	11.0

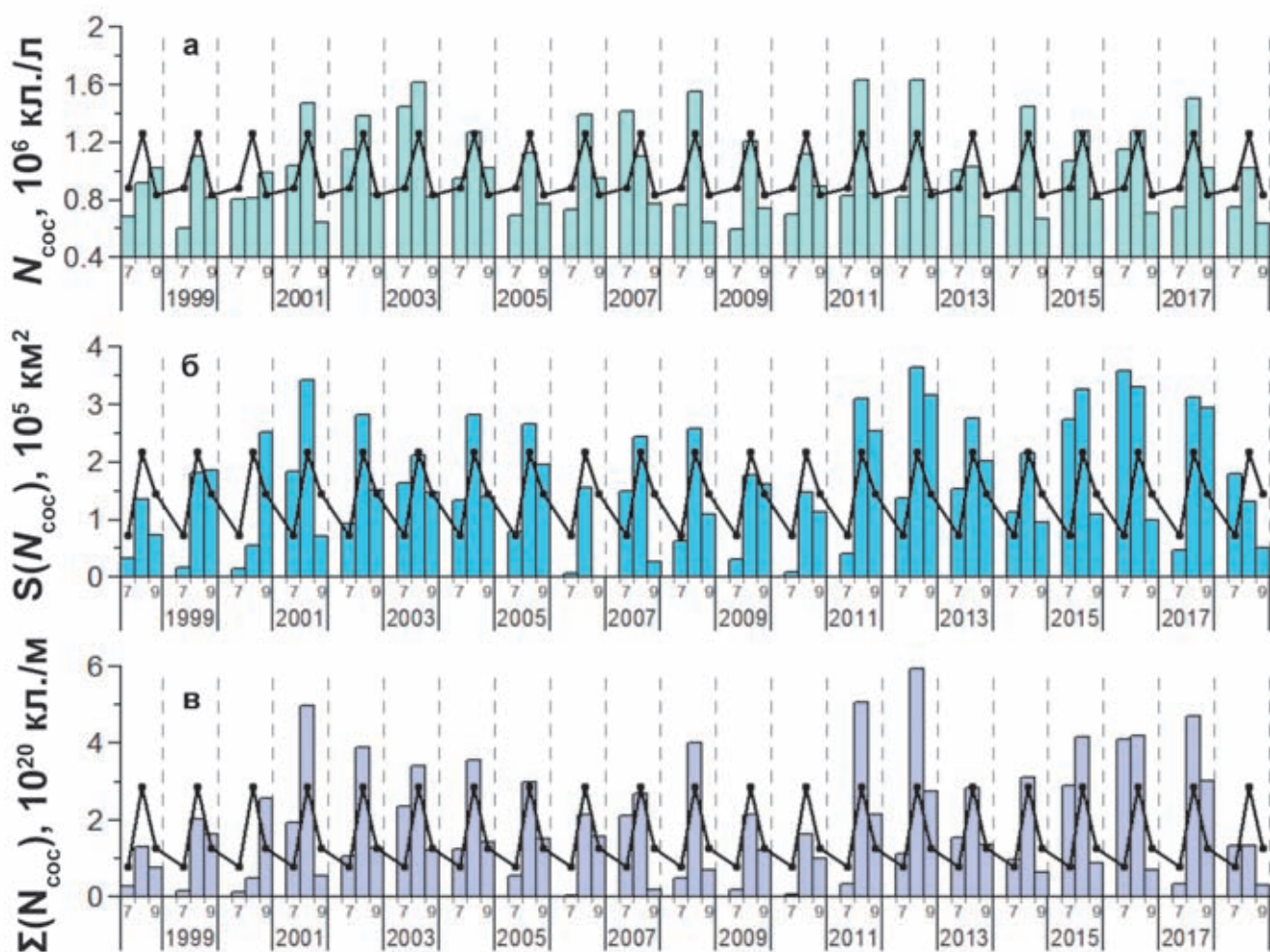


Рис. 5.1.3. Диаграммы изменения среднемесячных значений параметров кокколитофоридного цветения в Баренцевом море с 1998 по 2018 гг., рассчитанных по площади цветения, за границу которого принято значение $N_{coc} = 0.5$ млн кл/л:

а – концентрация клеток N_{coc} (млн кл./л); б – общая площадь цветения S (10^5 км²); в – общее количество клеток кокколитофорид в метровом слое $\Sigma(N_{coc})$ (10^{20} кл./м³). Черные кривые показывают изменения среднемесячных «климатических» значений (осредненных за период 1998–2011 гг.)

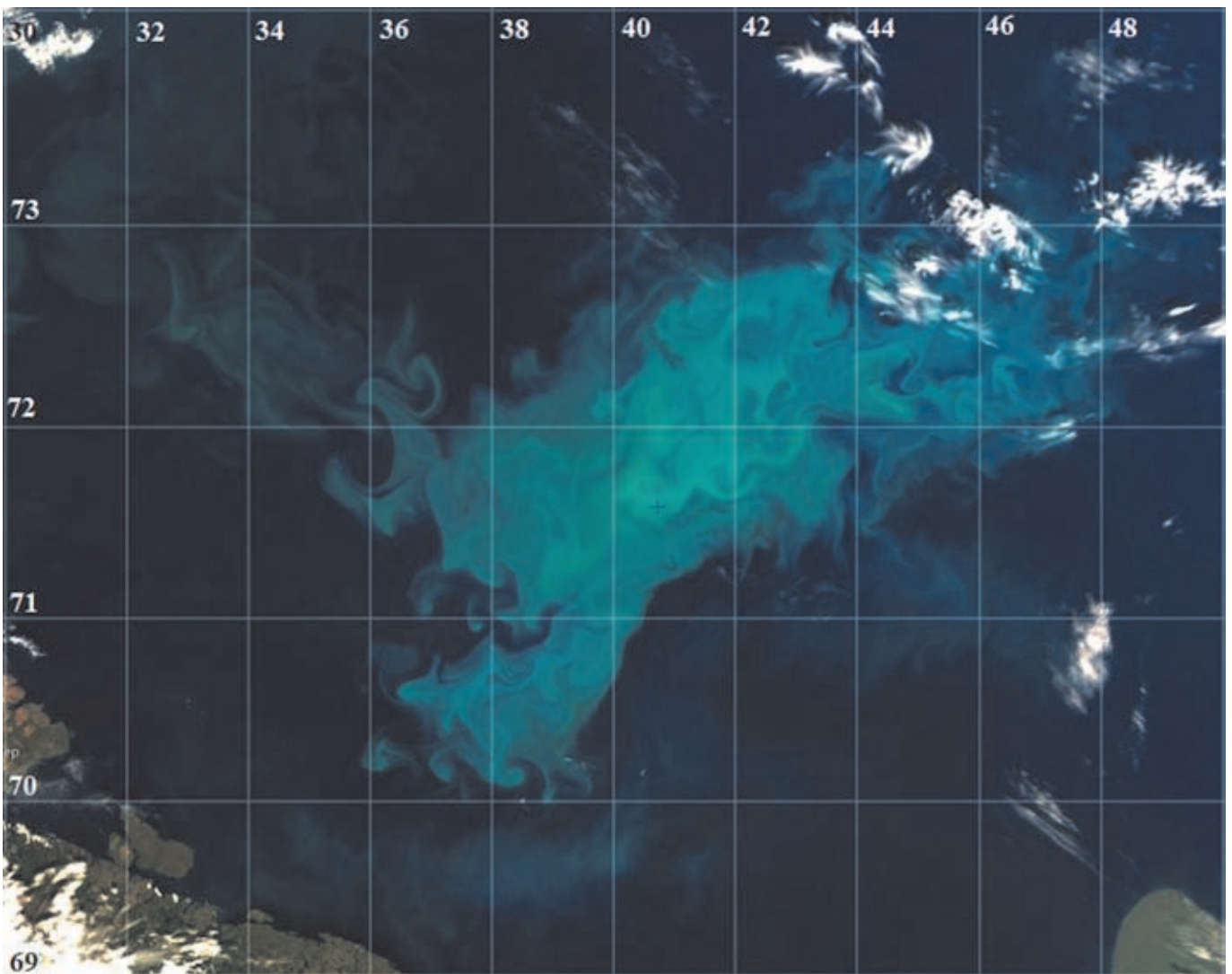


Рис. 5.1.4. Спутниковое изображение КЦ в Баренцевом море в видимом свете со сканера MODIS-Aqua 6.07.2016 г. (таким его увидел бы наблюдатель, находящийся на спутнике)

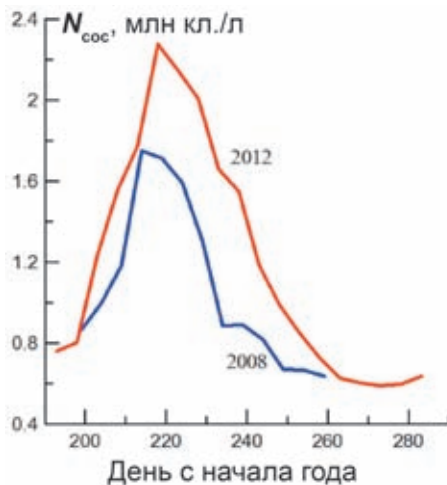


Рис. 5.1.5. Изменение осредненных за пять дней значений концентрации кокколитофорид N_{coc} (млн кл/л) в Баренцевом море в разные годы

Положение КЦ заметно варьирует по площади (рис. 5.1.6) в явной зависимости от распространения атлантических вод, поступающих в Баренцево море, в первую очередь Нордкапского течения, но всегда располагается южнее Полярного фронта.

На сайте НАСА <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov> для оценки КЦ по спутниковым данным предлагается стандартный продукт Particulate Inorganic Carbon – PIC (концентрация взвешенного неорганического углерода). Исследование связи между PIC и N_{coc} , выполненное в работе [Копелевич и др., 20176], показало, что между этими величинами наблюдается довольно высокая корреляция: коэффициент детерминации R^2 для объединенной выборки июль–август равен 0.82. Для пересчета в PIC среднемесячных значений N_{coc} для июля и августа (<http://optics.ocean.ru>) рекомендовано использовать уравнение регрессии: $\text{PIC, ммоль/м}^3 = 4.45 N_{\text{coc}} - 1.27$, где N_{coc} (млн кл/л).

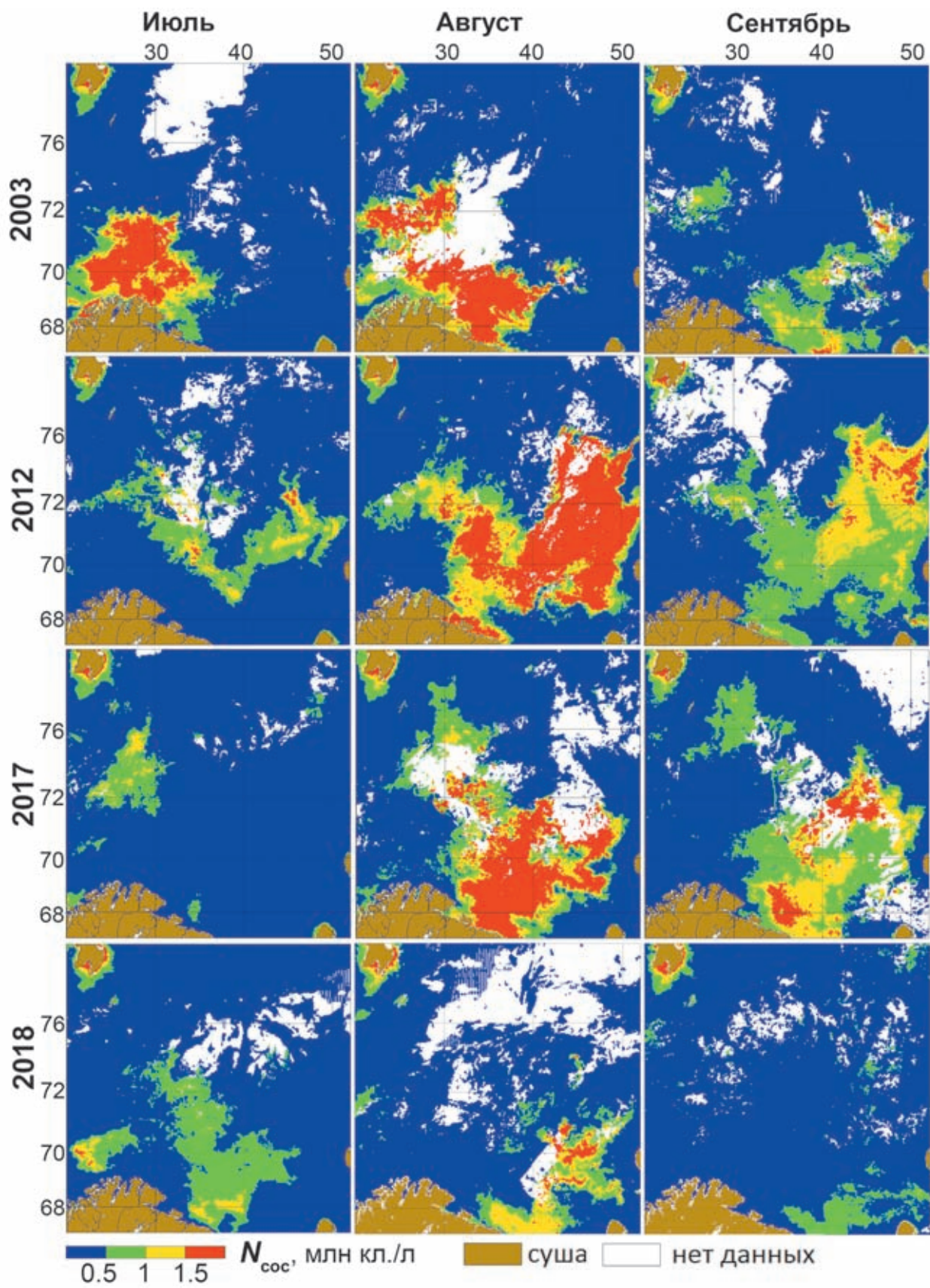


Рис. 5.1.6. Среднемесячные распределения кокколитофоридных цветений в Баренцевом море в июле, августе и сентябре в разные годы

Ошибка регрессии для этого уравнения составляет 0.65 ммоль/м³, коэффициент вариации 18%.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ

Количественная оценка проникновения солнечной радиации видимого диапазона спектра 400–700 нм (фотосинтетически активной радиации – ФАР) в воды разных морей, в том числе Баренцева, необходима для исследования двух важных проблем: во-первых, как фактора, определяющего создание первичной продукции фитопланктона, во-вторых, в аспекте влияния на тепловой баланс поверхностного слоя. Общие вопросы распространения солнечного излучения в водной среде, включая изменение с глубиной фотосинтетически

активной радиации (ФАР), оценки глубины продуктивного (фотического) слоя, расчет квантовой облученности и возможности оценок по спутниковым данным, рассмотрены в [Копелевич, 2014]. Последние открывают новые возможности для оценки баланса солнечной радиации на больших площадях, а также для исследования роли различных влияющих факторов путем моделирования.

В настоящее время количественные оценки ФАР, падающей на поверхность моря, доступны как стандартный продукт на сайте НАСА (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>); метод такого расчета разработан и успешно применен для Баренцева моря в работах ИО РАН [Копелевич и др., 2003, 2006; Vazyulya et al., 2016]. Пример расчетов для безоблачного и облачного случаев показан на рис. 5.1.7.

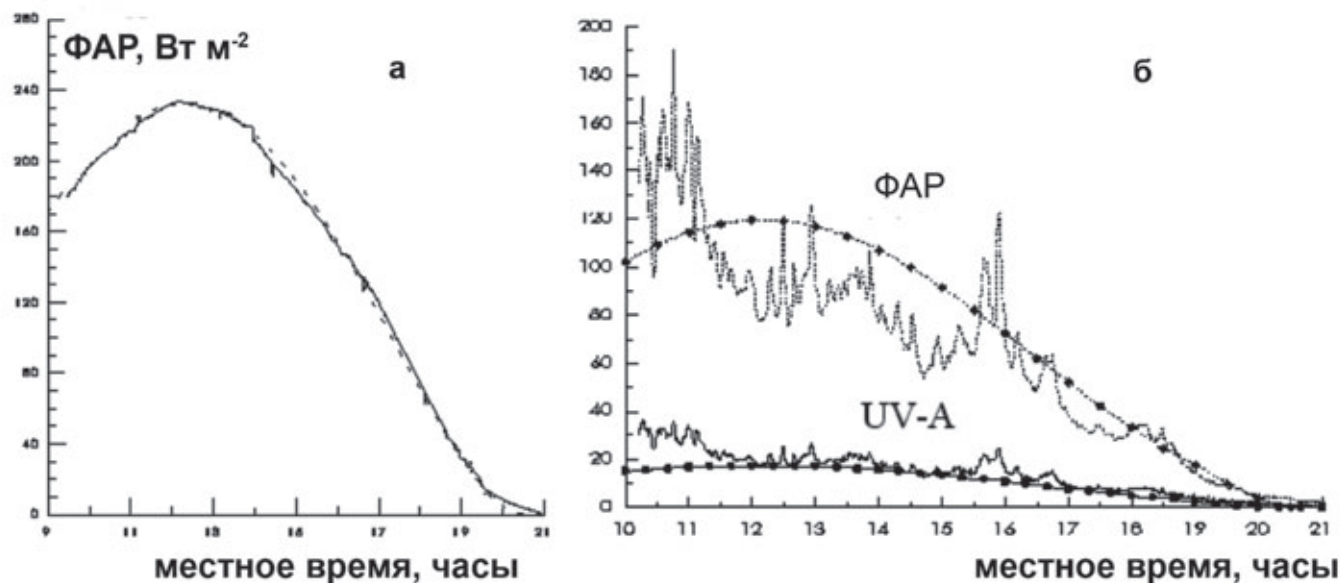


Рис. 5.1.7. Изменение величин ФАР ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$) на поверхности Баренцева моря в течение дня в августе 1998 г. по данным сканера SeaWiFS:

а – безоблачное небо; б – переменная облачность [Ершова и др., 2001]

Облачность – главный фактор (если не считать сезонных изменений), определяющий количество солнечной радиации в течение суток (дневную экспозицию), падающей на поверхность моря. Рис. 5.1.8 количественно иллюстрирует влияние облачности на среднемесячные величины ФАР на поверхности Баренцева моря в августе 2002 г. Видно, что при одном и том же значении ФАР на верхней границе атмосферы (примерно $10.5 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{день}^{-1}$ на широте 75° с. ш.); значения дневной экспозиции на поверхности моря уменьшаются в зависимости от облачности более чем в 2.5 раза (меньше $4 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{день}^{-1}$).

Излучение видимого диапазона, в отличие от инфракрасного, может проникать в водную толщу на

несколько десятков метров и, благодаря объемному поглощению, оказывать влияние на термическую структуру и теплосодержание поверхностного слоя. В работе [Копелевич и др., 2006] удалось показать возможность количественной оценки по спутниковым данным объемного поглощения солнечного излучения в подповерхностном слое вод даже в таком трудном для использования спутниковых данных регионе, как Баренцево море (низкие высоты Солнца, частая облачность). Результаты выполненного численного эксперимента показали, что ошибка расчета ФАР, поглощенной в водной толще, в отсутствие облачности по данным спутникового сканера SeaWiFS в верхнем 10-метровом слое меньше 10%, а в слое

10–20 м – меньше 20%. Основная часть этой ошибки связана с неточностью определения по данным SeaWiFS входных параметров расчета – при использовании точных значений этих параметров ошибки составляют лишь 1–3% для 10-метрового слоя и меньше 6% для 20-метрового.

Пример сравнения вертикальных профилей ФАР, измеренных погружаемым радиометром и рассчитанных по данным сканера SeaWiFS, показан на рис. 5.1.9.

На проникновение солнечной радиации в водную толщу существенное влияние оказывают кокколитофоридные цветения. По спутниковым данным были выполнены расчеты величин подводной ФАР и аль-

bedo водной толщи для 14 точек на 71° с. ш. от 35° до 42° в. д. через область кокколитофоридного цветения [Копелевич и др., 2017a].

Результаты представлены на рис. 5.1.10. Как видно, кокколитофоридное цветение оказывает сильное воздействие на проникновение солнечной радиации в водную толщу: при отсутствии цветения альbedo составляет меньше 1% (на 41° в. д.), при возрастании концентрации кокколитофорид до 2.6 млн кл/л альbedo возрастает почти до 8% (на 40° в. д.). Величина нисходящей ФАР на глубине 5 м уменьшилась еще более резко – от 135 Вт/м² на 41° в. д. до 79 Вт/м² на 40° в. д. (более чем на 40%).

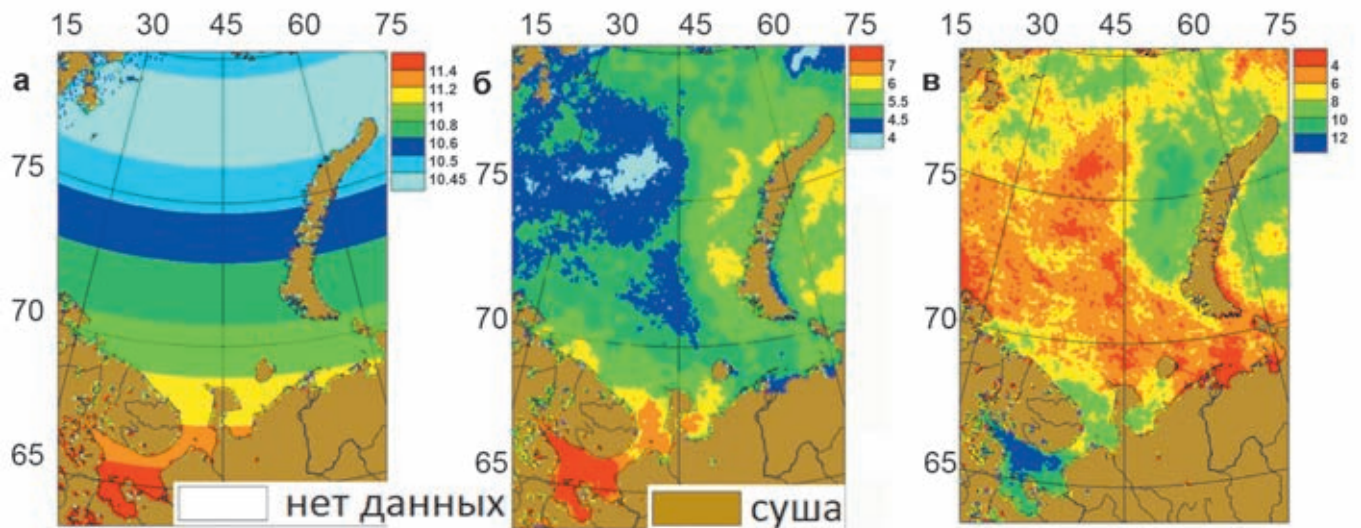


Рис. 5.1.8. Среднемесячные распределения дневной экспозиции ФАР (МДж м⁻² день⁻¹) на верхней границе атмосферы (а) и на поверхности моря (б) и оптической толщины облаков (в) в августе 2002 г. по данным сканера SeaWiFS

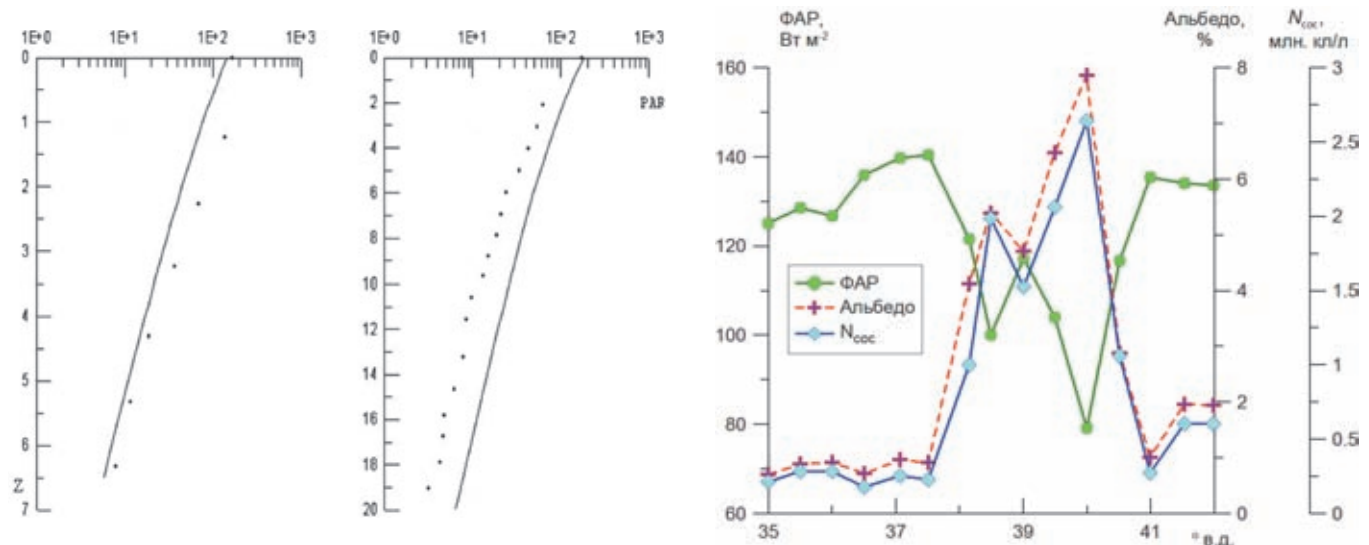


Рис. 5.1.9. Вертикальные профили ФАР на двух станциях в Баренцевом море в августе 1998 г., измеренные подводным радиометром (кружки) и рассчитанные по данным сканера SeaWiFS (сплошные кривые) [Ершова и др., 2001]

Рис. 5.1.10. Изменение ФАР (Вт·м⁻²) на глубине 5 м (зеленая кривая), концентрации кокколитофорид N_{coc} (млн кл./л) (синяя) и альbedo водной толщи (красный пунктир) вдоль 71° с. ш. по данным сканера MODIS-Aqua 06 июля 2016 г.

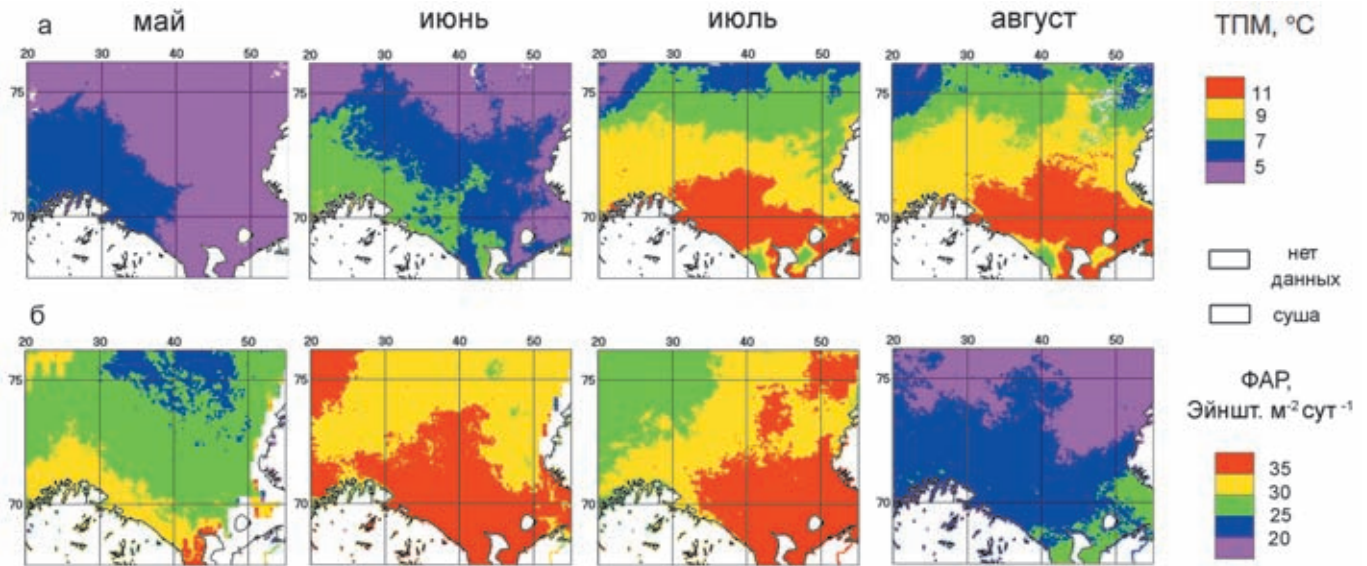


Рис. 5.1.11. Среднемесячные распределения поверхностной ТПМ ($^{\circ}\text{C}$) (а) и дневной экспозиции ФАР, $\text{Э}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ (б) с мая по август 2016 г.

Приходящая на поверхность моря солнечная радиация оказывает заметное влияние на температуру поверхностного слоя (ТПМ) средней части Баренцева моря. Если в мае–июне увеличение ТПМ явно связано

с поступлением теплых атлантических вод с Норвежским течением, то в июле–августе положение более теплых вод соответствует области повышенных значений ФАР (больше $35 \text{ Э}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$) на июльской карте.

5.2. Вертикальная структура водной толщи Баренцева моря по оптическим данным

В.И. Буренков, В.А. Артемьев

Институт океанологии им. П.П. Шириова РАН, Москва

В соответствующем разделе рассматриваются вертикальные распределения показателя ослабления света морской водой в различных районах Баренцева моря. Полученные за последнее время данные свидетельствуют о значительной пространственно-временной изменчивости оптических свойств. В частности выделяется район, подверженный влиянию речного стока (Печорской море). Аномально высокими значениями показателя ослабления отличаются районы, связанные с цветением кокколитофорид. Имеется ряд особенностей, связанных с поступлением Атлантических вод в Баренцево море. Показана тесная связь между показателем ослабления и концентрацией взвеси. Получено соответствующее уравнение регрессии.

Ключевые слова: показатель ослабления света, оптические свойства, кокколитофориды, взвесь.

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(19)

ВВЕДЕНИЕ

Измерение показателя ослабления света морской водой S и его вертикального распределения – один из наиболее распространенных видов гидрооптических наблюдений, поскольку величина S в значительной степени определяет процессы распространения оптического излучения в водной толще. Учитывая высокое пространственное разрешение измерите-

лей вертикальной структуры показателя ослабления, данные по S широко используются для сопоставления с результатами измерений STD зондов, что особенно ценно при оценках ситуации во фронтальных зонах, цветениях фитопланктона и зонах, подверженных воздействию пресноводного стока. Величина показателя ослабления тесно связана с концентрацией морской взвеси и может использоваться для