

УДК 551.465

ПРОНИКНОВЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА В ВОДЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ОБЛАЧНОСТИ И КОККОЛИТОФОРИДНЫХ ЦВЕТЕНИЙ

© 2017 г. О. В. Копелевич, С. В. Вазюля, А. В. Григорьев,
А. Н. Храпко, С. В. Шеберстов, И. В. Салинг

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

e-mail: oleg@ocean.ru

Поступила в редакцию 15.11.2016 г.

На основе спутниковых и судовых данных выполнена количественная оценка проникновения солнечной радиации видимого диапазона спектра 400–700 нм (фотосинтетически активной радиации) в воды средней части Баренцева моря в летний сезон 2014–2016 гг. Исследовано влияние на поступление и проникновение фотосинтетически активной радиации облачности и кокколитофоридных цветений; последние наблюдаются в Баренцевом море в июле–сентябре практически ежегодно. Проведена оценка влияния изменений приходящей солнечной радиации видимого диапазона на температуру поверхности моря. Эта оценка показала, что, на фоне главного фактора – поступления теплых атлантических вод с Норвежским течением, влияние радиации видимого диапазона наиболее ярко проявляется в июле–августе в условиях безоблачного неба.

DOI: 10.7868/S0030157417020095

ВВЕДЕНИЕ

Количественная оценка проникновения солнечной радиации видимого диапазона спектра 400–700 нм (фотосинтетически активной радиации – ФАР) в воды арктических морей 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. 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.

Солнечная радиация, создающая фотический слой, в котором происходит фотосинтез и создание первичной биопродукции, – важнейший фактор, определяющий развитие морских экосистем и производство биоресурсов; в арктических условиях этот фактор большую часть года является лимитирующим. Много работ посвящено изменению количества ФАР, поступающей в фотический слой, из-за уменьшения в арктических морях площади и толщины ледяного покрова. Оценки общего количества поступающей ФАР в арктическом регионе по данным модельных расчетов показали ее возрастание с 1988 по 2007 г. на 43%, первичной продукции – на 50% [10].

В водах арктических морей натурные измерения ФАР проводятся относительно редко, что не позволяет оценить пространственную и временную изменчивость поступающей ФАР и исследовать влияние на нее различных факторов. Единственная возможность для выполнения таких исследований – использование данных спутниковых наблюдений, которые проводятся регулярно в течение многих лет и охватывают одновременно большие акватории.

В настоящей работе на основе спутниковых и судовых данных исследуется влияние на поступление и проникновение ФАР в воды Баренцева моря таких факторов, как облачность и кокколитофоридные цветения; последние наблюдаются в Баренцевом море в июле–сентябре практически ежегодно. Кроме того, сделана попытка оценить, какое влияние оказывает изменение приходящей ФАР на температуру поверхности моря (ТПМ).

Первая из названных проблем требует выполнения сравнительных оценок падающей на поверхность солнечной радиации при безоблачном небе и в условиях облачности, вторая – оценки спектральных показателей диффузного ослабления нисходящего потока солнечной радиации при наличии и отсутствии цветений.

Ранее для таких расчетов были разработаны соответствующие алгоритмы [5, 6] и выполнены оценки их ошибок [6, 9]. В настоящее время днев-

ные экспозиции поверхностной ФАР и значения показателя диффузного ослабления $K_d(490)$ для длины волны 490 нм также доступны как стандартные продукты обработки данных спутниковых сканеров цвета на сайте НАСА <http://ocean-color.gsfc.nasa.gov>.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования, выполненные в настоящей работе, основаны на данных судовых и спутниковых измерений во время перегонных рейсов из Калининграда в Архангельск через Балтийское, Норвежское и Баренцево моря: 127-го рейса НИС “Профессор Штокман” с 26 июля по 5 августа 2014 г.; 62- и 65-го рейсов НИС “Академик Мстислав Келдыш” с 22 июля по 18 августа 2015 г. и с 29 июня по 9 июля 2016 г., соответственно. В 2014 г. измерения проводились только на ходу судна, в 2015 и 2016 гг. в Баренцевом море выполнены несколько дрейфовых станций. Представленные результаты основаны на данных спутниковых измерений; данные *in situ* использовались для валидации спутниковых оценок.

Спутниковые данные. Использовались данные спутникового спектрорадиометра MODIS-Aqua, доступные на сайте НАСА <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>.

Для оценки влияния облачности на величину поверхностной ФАР использовались измеренные значения спектральной яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы (L_{TOA}) уровня 1А с пространственным разрешением 1 км и вспомогательные данные, необходимые для проводимых расчетов. Величины дневной экспозиции ФАР на поверхности моря рассчитывались с помощью ранее разработанного алгоритма [5]. Этот алгоритм учитывает случаи как безоблачной, так и облачной атмосферы. Наличие или отсутствие облачности определяется по флагу облачности. Понятие “разорванной облачности” отсутствует: каждый пиксель принимается однородным (он воспринимается спутниковым датчиком либо как “облачный”, либо как “безоблачный” в зависимости от флага облачности для данного пикселя). Для безоблачного и облачного случаев используются соответственно алгоритмы [3] и [2]. Для облачных пикселей определяется параметр облачности X , который определяет пропускание солнечного света облачным слоем (для безоблачных пикселей $X = 1$). Параметр $X = 4q/(\tau_{\text{cl}} + q)$, где τ_{cl} – оптическая толщина облачного слоя, q – параметр индикатрисы рассеяния [4]. Предлагаемая методика не требует определения оптической толщины облачного слоя, и тем самым удается избежать ошибок, связанных с неточностью знания микроструктуры облака.

В отличие от сканера цвета SeaWiFS, у которого все видимые каналы “не насыщаются” при измерении L_{TOA} над облаками, в случае MODIS-Aqua можно использовать данные только трех каналов: 469, 555 и 645 нм. Параметры атмосферы определяются в момент пролета спутника и при вычислении дневной экспозиции ФАР предполагаются неизменными в течение всего дня; учитывается лишь изменение высоты Солнца.

Для контроля полученные значения ФАР сопоставлялись с соответствующими данными дневных экспозиций ФАР на сайте НАСА. Стандартный продукт обработки данных MODIS-Aqua представлен в квантовых единицах – Эйншт. $\text{м}^{-2} \text{сут}^{-1}$. Далее для оценки мгновенных величин подводной ФАР используются энергетические единицы – $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Для перевода квантовых единиц в энергетические можно использовать приближенное соотношение: 1 МДж = 4.6 Эйншт.

Для оценки влияния изменений приходящей ФАР на ТПМ использовались среднемесячные значения дневных экспозиций ФАР с пространственным разрешением 4 км с мая по август (файлы 3-го уровня на сайте НАСА). Среднемесячные значения ТПМ 3-го уровня для каждого месяца рассчитывались осреднением файлов 2-го уровня на сайте НАСА на сетке 3×3 км, при этом отбраковывались данные с уровнем качества больше 2 (уровень качества ТПМ меняется в пределах от 0 до 4: 0 – наилучшее, 4 – самое плохое).

Для оценки влияния кокколитофоридных цветений на проникновение ФАР использовались данные о коэффициенте яркости моря (remote sensing reflectance) $R_{\text{rs}}(\lambda_i)$ 2-го уровня с пространственным разрешением 1 км. Спектральные показатели диффузного ослабления нисходящего потока солнечной радиации $K_d(\lambda)$ для видимого диапазона рассчитывались с шагом 20 нм по формуле Гордона [8] $K_d = 1.04 D_0(a + b_b)$, где D_0 зависит от высоты Солнца и доли диффузного излучения в общем потоке излучения, падающего на поверхность. В работе [8] ключевые значения D_0 заатабулированы. Спектральные показатели поглощения a и рассеяния назад b_b морской воды рассчитываются через параметры полуаналитической модели оптических свойств воды. Концентрация хлорофилла Chl определяется по региональному алгоритму (<http://optics.ocean.ru>), а остальные параметры – при помощи алгоритма [1], в котором используются величины R_{rs} для семи спектральных каналов сканера MODIS (488, 531, 547, 555, 645, 667 и 678 нм). Для Баренцева моря при цветении кокколитофорид для спектральной зависимости показателя рассеяния назад взвешенными частицами $b_{\text{bp}}(\lambda)$, в отличие от Карского и Белого морей [1], используется степенной закон с показателем степени $n = -1.35$ [7]. Альбедо водной толщи рассчитывалось так же, как в рабо-

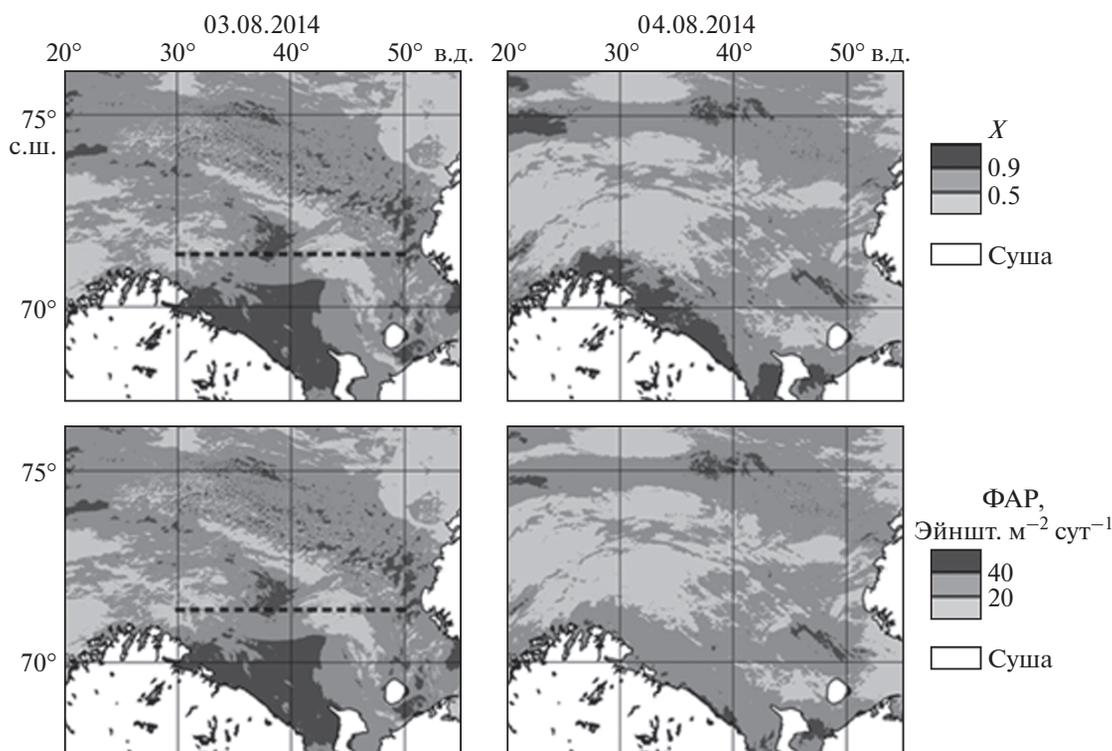


Рис. 1. Пространственные распределения параметра облачности X (верхние рисунки) и величины дневной экспозиции ФАР на поверхности океана (нижние) в Баренцевом море 3.08.2014 г. и 4.08.2014 г., рассчитанных по данным MODIS. На рисунках для 3.08.2014 г. (слева) пунктиром показано положение широтного разреза, для которого приводятся данные на рис. 2.

те [5]. Для расчета пространственного распределения концентрации кокколитофорид использовался региональный алгоритм для Баренцева моря (<http://optics.ocean.ru>).

Судовые измерения. Прямые измерения спектральных величин подводной облученности $E_d(z, \lambda)$, создаваемой нисходящим потоком солнечного излучения, в зависимости от глубины z были проведены на трех станциях в 62-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2015 г. Измерения проводились посредством гиперспектрального радиометра RAMSES, модель ACC-VIS производства компании TriOS Optical Sensors, Германия (www.trios.de).

Радиометр предназначен для мгновенного измерения спектральных величин облученности в диапазоне длин волн 320–950 нм с разрешением 3 нм до глубины 100 м. Динамический диапазон канала облученности 3 – 0.003 Вт м⁻² нм⁻¹. Для проведения измерений прибор устанавливается на специальной раме, данные с погружаемого прибора передаются в палубный блок по кабелю; регистрация и обработка данных выполняется на ноутбуке. Прибор откалиброван компанией TRIOS по стандартам NIST.

Через измеренные значения $E_d(z, \lambda)$ рассчитывались показатели диффузного ослабления под-

водной облученности $K_d(\lambda)$, в предположении выполнения экспоненциального закона ослабления с глубиной: $E_d(z) = E_d(0^-) \exp[-K_d z]$, где, для простоты, длина волны λ опущена. Величина поверхностной облученности $E_d(0^-)$ вычислялась по данным измерений путем экстраполяции измеренных величин $E_d(z)$ к горизонту $z = 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка влияния облачности на величину поверхностной ФАР. На рис. 1 сравниваются распределения параметра облачности X и величин дневной экспозиции ФАР в Баренцевом море 3 и 4 августа 2014 г., рассчитанные по данным MODIS-Aqua. Видно хорошее соответствие между двумя распределениями – высокие значения ФАР связаны со значениями X , близкими к 1 (например, 3 августа 2014 г. область значений ФАР больше 40 Эйншт. м⁻² сут⁻¹ вблизи побережья Кольского полуострова четко соответствует области значений X больше 0.9), тогда как низкие значения ФАР – значениям X меньше 0.5 (например, 4 августа 2014 г. область величин ФАР меньше 20 Эйншт. м⁻² сут⁻¹ в западной половине рассматриваемой области соответствует значениям X меньше 0.5).

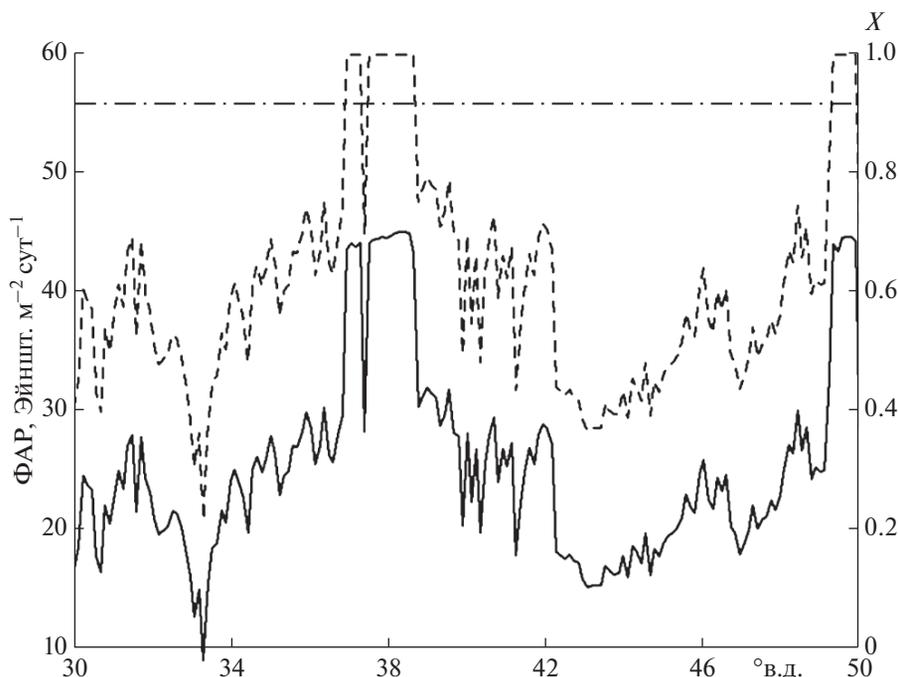


Рис. 2. Изменение параметра облачности X (пунктир) и величины дневной экспозиции ФАР (Эйншт. $\text{м}^{-2} \text{сут}^{-1}$) на поверхности океана (сплошная линия) на широтном разрезе по 71.5° с.ш. 3.08.2014 г. Штрих-пунктирная линия показывает значение дневной экспозиции ФАР для рассматриваемой широты на верхней границе атмосферы.

Количественную связь между изменениями параметра X и ФАР иллюстрирует рис. 2, на котором показаны изменения параметра облачности X и величины дневной экспозиции ФАР 3 августа 2014 г. на широтном разрезе по 71.5° с.ш. между 30° и 50° в.д. Видно, что изменение ФАР четко следует за изменением X : когда X уменьшается до значений, близких к 0.2, величина ФАР падает ниже $10 \text{ Эйншт. м}^{-2} \text{сут}^{-1}$; наоборот, при X , близких к 1 (безоблачное небо около 38° в.д.), значения ФАР возрастает до $45 \text{ Эйншт. м}^{-2} \text{сут}^{-1}$.

Рис. 2 дает возможность оценить пропускание ФАР атмосферой в зависимости от параметра X : при $X = 1$ его значение равно ≈ 0.80 , при $X = 0.22$ оно составляет ≈ 0.16 .

Как видно из рис. 1, в целом в средней части Баренцева моря (<http://optics.ocean.ru>) день 4 августа был более облачным, чем 3 августа: средние по региону значения параметра X составили соответственно 0.60 и 0.69, а соответствующие значения средних ФАР равнялись 23.8 и $28.4 \text{ Эйншт. м}^{-2} \text{сут}^{-1}$. Для сравнения, аналогичные значения по алгоритму НАСА равнялись 27.7 и $33.8 \text{ Эйншт. м}^{-2} \text{сут}^{-1}$, т.е. примерно на 16 и 19% выше. Мы отдаем предпочтение нашим значениям: в работе [9] прямым сравнением рассчитанных ФАР с измеренными показано, что алгоритм Института океанологии дает лучшее согласие с натурными данными.

Влияние кокколитофоридных цветений на пропускание ФАР в воды поверхностного слоя. Как уже отмечалось выше, для проведения таких оце-

нок необходимо знать спектральные показатели диффузного ослабления нисходящего потока солнечной радиации $K_d(\lambda)$. В работе [6] на основе численного моделирования детально исследовались ошибки расчета K_d по спутниковым данным и было показано, что ошибки K_d и, следовательно, $E_d(z)$ определяются ошибками определения R_{rs} , т.е., в первую очередь, ошибками атмосферной коррекции спутниковых данных.

В настоящей работе определения ошибок оценок K_d и $E_d(z)$ выполнены путем прямого сравнения с данными измерений $E_d(z)$ прибором RAMSES (см. раздел “Материалы и методы”). Измерения проведены в 62-м рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” на двух станциях: 5193 (73.34° с.ш., 43.70° в.д.) — 17 августа 2015 г. и 5195 (71.00° с.ш., 42.99° в.д.) — 18 августа 2015 г. Безоблачные спутниковые данные (сканер MODIS-Aqua) получены 14 августа 2015 г. для двух пролетов спутника в 8:15 и 9:55 GMT. Хотя атмосферные условия в указанные дни заметно различались, состояние поверхностного слоя моря было довольно стабильным.

Результаты расчетов спектральных величин $K_d(\lambda)$ на указанных станциях представлены на рис. 3. Как видно, значения $K_d(\lambda)$ по данным измерений *in situ* для рассматриваемых станций очень близки друг к другу: в максимуме пропускания $520\text{--}560 \text{ нм}$ K_d равно 0.26 м^{-1} на ст. 5193 и $0.27\text{--}0.28 \text{ м}^{-1}$ на ст. 5195. По спутниковым дан-

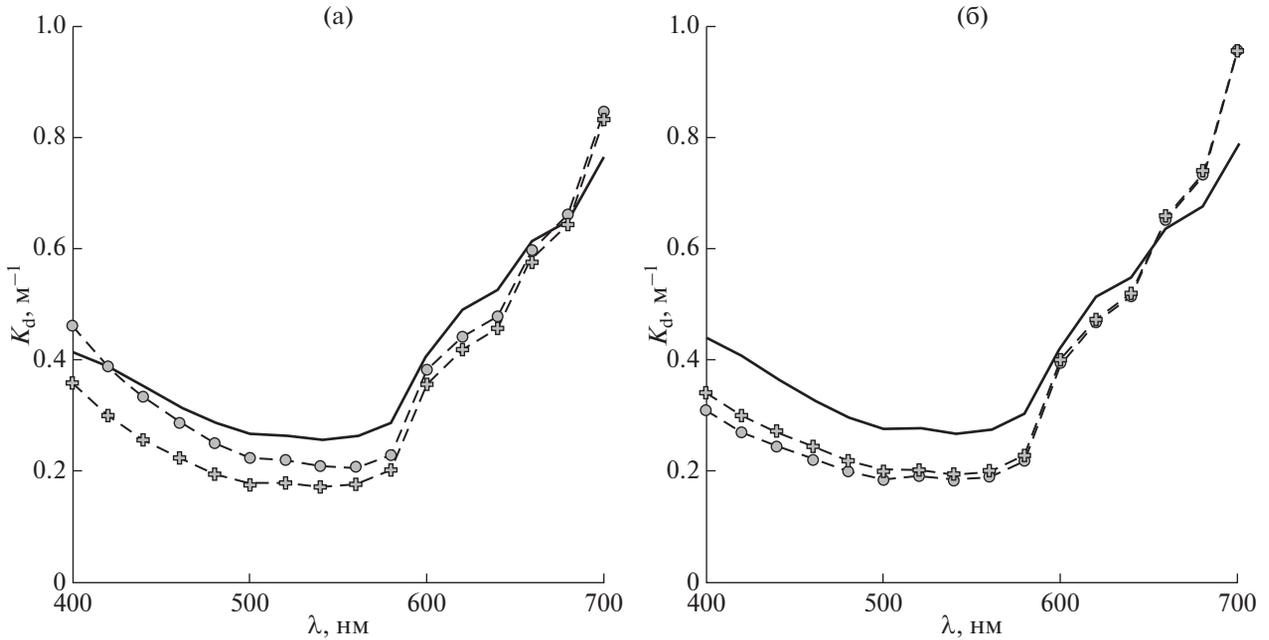


Рис. 3. Сравнение величин спектрального показателя диффузного ослабления K_d (м^{-1}), рассчитанного по натурным данным (сплошные линии) и по данным сканера MODIS-Aqua (пунктирные линии) для ст. 5193 (а) и ст. 5195 (б). Данные MODIS получены 14.08.2015 г. для двух пролетов спутника: GMT 8 : 15 – кружочки, GMT 9 : 55 – крестики.

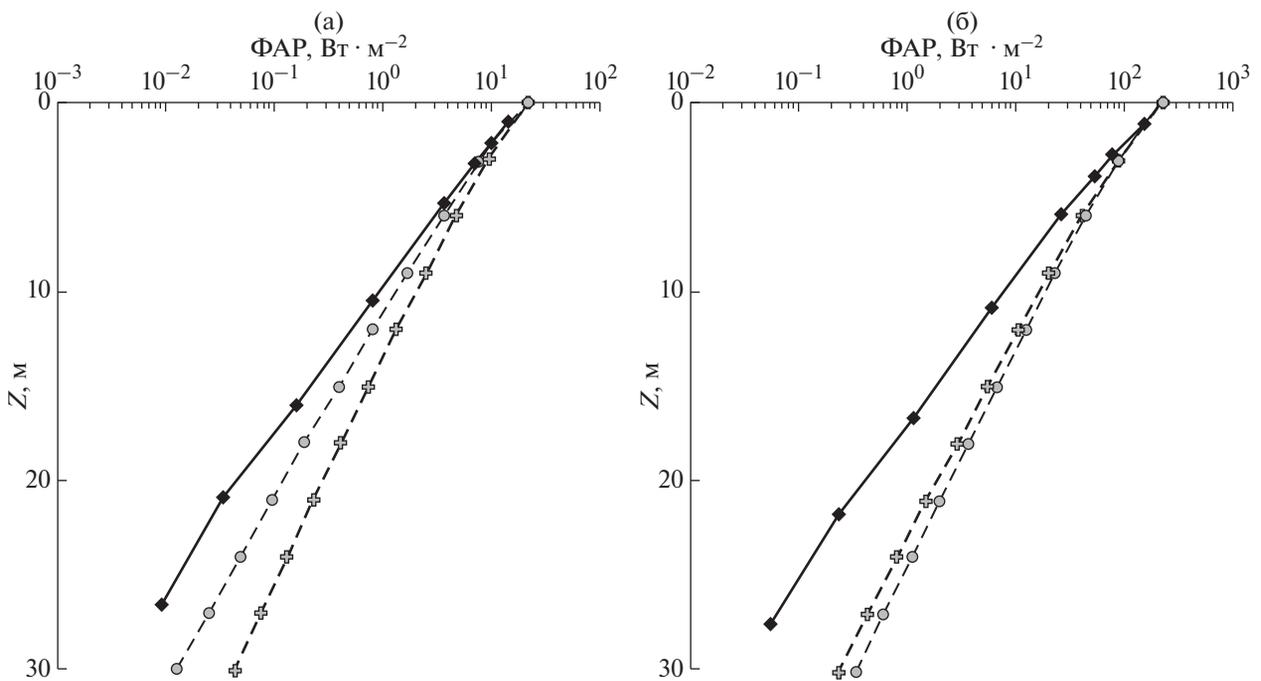


Рис. 4. Изменения нисходящей ФАР с глубиной по данным измерений (сплошная линия, ромбики) и спутниковым данным (пунктирная линия) на ст. 5193 (а) и ст. 5195 (б). Данные MODIS получены 14.08.2015 г. для двух пролетов спутника: GMT 8 : 15 – кружочки, GMT 9 : 55 – крестики.

ным, расчетные значения K_d для ст. 5193 оказались ближе к измеренным для пролета 8:15—0.21—0.22 м^{-1} (расхождения 0.04—0.05 м^{-1}), для ст. 5195 они были примерно одинаковы для обоих пролетов: 0.18—0.19 м^{-1} для пролета 8:15 и 0.19—0.20 м^{-1} для пролета 9:55.

Сравнение величин подводной ФАР в зависимости от глубины по спутниковым данным и по данным измерений показано на рис. 4. Расхождение, естественно, увеличивается с глубиной; на 5 м ошибка составляет примерно 24% для ст. 5193 и около 70% для ст. 5195. Учитывая разницу во

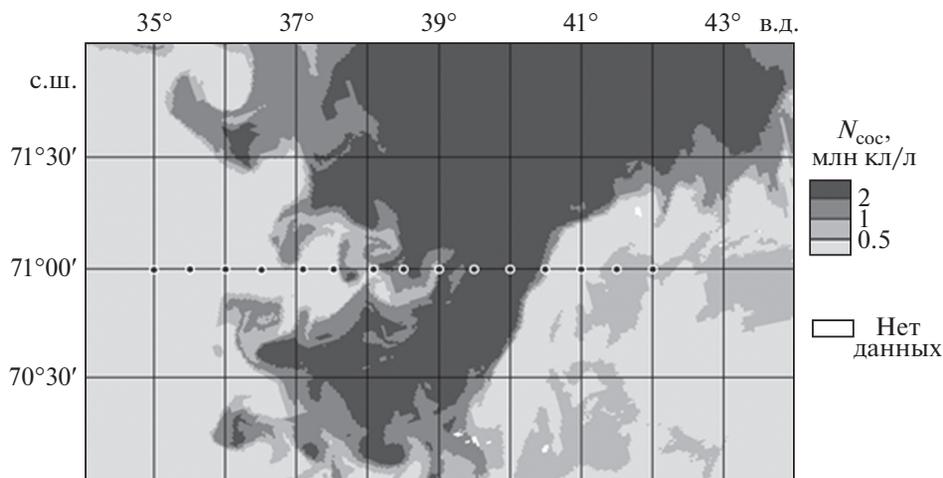


Рис. 5. Пространственное распределение концентрации кокколитофорид N_{coc} (млн кл/л) по данным MODIS 6.07.2016 г. (GMT 10:00). Показаны точки на широтном разрезе по 71° с.ш., для которых были проведены расчеты.

времени между судовыми и спутниковыми измерениями, такие расхождения можно признать приемлемыми.

Для исследования влияния кокколитофоридного цветения на величины подводной ФАР и альbedo водной толщи были выполнены расчеты по спутниковым данным для 15 точек на разрезе по 71° с.ш. от 35° до 42° в.д. через область кокколитофоридного цветения (рис. 5). Для расчетов использовались данные MODIS 6 июля 2016 г. (GMT 10:00), для каждой точки рассчитывалась средняя величина по 9 ближайшим пикселям.

Как видно из рис. 6, кокколитофоридное цветение оказывает сильное воздействие на проник-

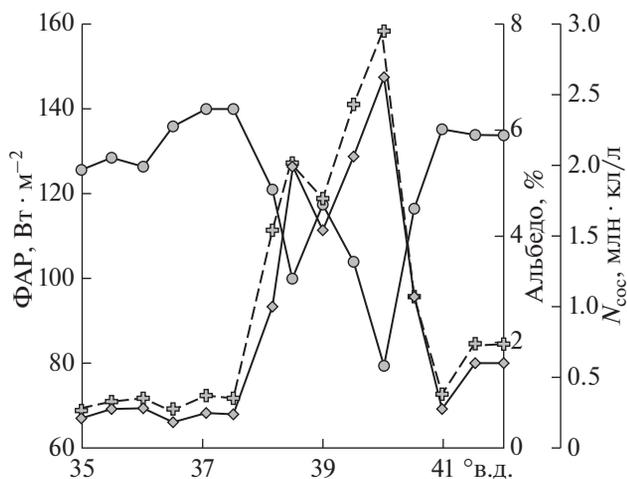


Рис. 6. Изменение величины ФАР на глубине 5 м ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, кружки, сплошная линия), концентрации кокколитофорид N_{coc} (млн кл/л, ромбики, сплошная линия) и альbedo водной толщи (% крестики, пунктирная линия) на разрезе по 71° с.ш. по данным MODIS 6.07.2016 г. (GMT 10:00).

новение 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 уменьшается еще более резко – от $135 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ на 41° в.д. до $79 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ на 40° в.д. (более чем на 40%).

Влияние изменений приходящей ФАР на температуру поверхности моря. Температура поверхностного слоя западной половины Баренцева моря определяется, в первую очередь, поступлением теплых атлантических вод с Норвежским течением. Но поступающая солнечная радиация, как инфракрасного, так и видимого диапазонов, тоже вносит свой вклад.

На рис. 7 показаны среднемесячные распределения ТПМ и ФАР в Баренцевом море с мая по август 2016 г. В мае и июне на картах ТПМ виден поток теплой воды, поступающей с запада с Норвежским течением. В июле–августе более теплые воды находятся в юго-восточной части Баренцева моря, и их положение соответствует области повышенных значений ФАР (больше $35 \text{ Эйншт. м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) на июльской карте.

Изменение среднемесячных значений ТПМ и ФАР, усредненных по площади средней части Баренцева моря (<http://optics.ocean.ru>) с мая по сентябрь в 2014, 2015 и 2016 гг. показано на рис. 8. Видно, что в 2014 г. значения ТПМ примерно соответствуют “среднеклиматическим” (2003–2011 гг.) значениям, но в 2015 и 2016 гг. они во все месяцы заметно выше. Очевидно, что в этом повышении участвуют оба фактора: в мае главную роль играет Норвежское течение, так как значения ФАР в 2015 и 2016 гг. ниже, чем в 2014 г. (27.7 и 28.2 против $28.4 \text{ Эйншт. м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$), а ТПМ выше (3.5 и 3.9 против 2.5°C). Рекордно высокие значения ТПМ

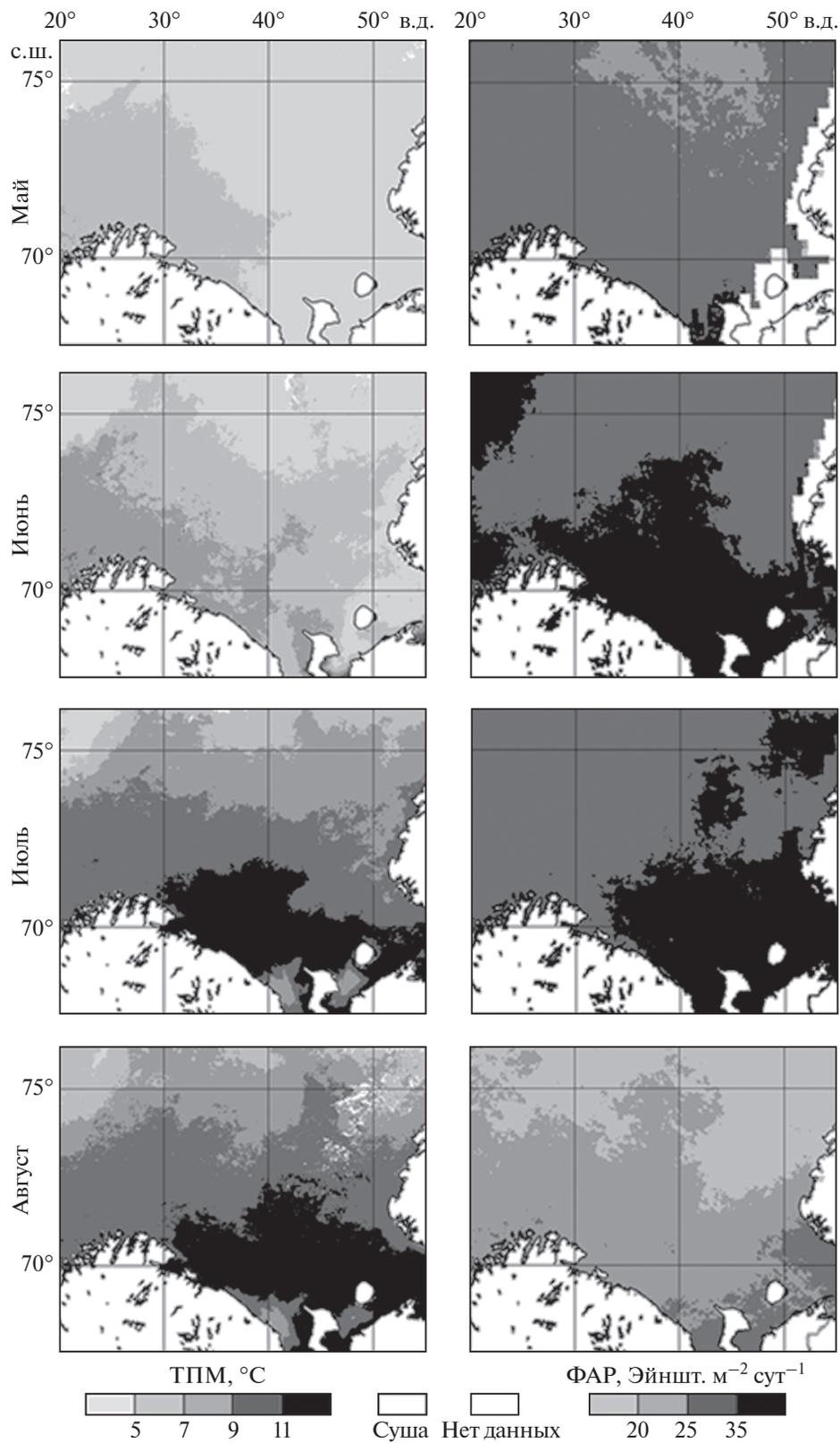


Рис. 7. Среднемесячные пространственные распределения ТПМ и ФАР в Баренцевом море с мая по август в 2016 г.

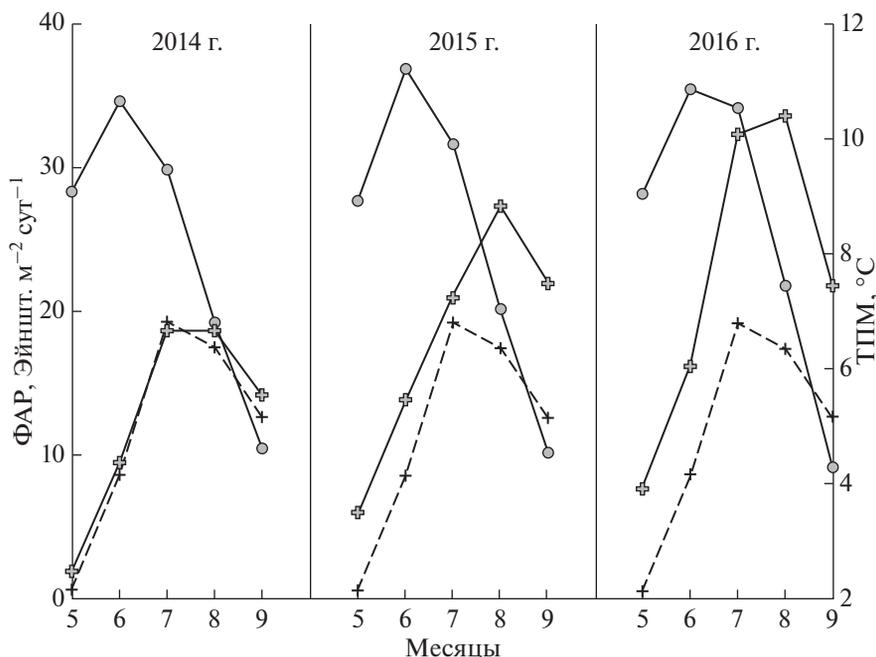


Рис. 8. Изменение среднемесячных значений ФАР (Эйншт. м^{-2} сут $^{-1}$, кружочки) и ТПМ ($^{\circ}\text{C}$, крестики) в средней части Баренцева моря в 2014, 2015 и 2016 гг. Пунктирные кривые показывают сезонные изменения, рассчитанные по усредненным (“среднеклиматическим”) значениям ТПМ за период 2003–2011 гг.

наблюдались в августе 2016 г. — 10.4°C , однако самая высокая величина ФАР зарегистрирована в июле 2015 г. — 36.9 Эйншт. м^{-2} сут $^{-1}$ (в июне 2016 г. — 35.5 Эйншт. м^{-2} сут $^{-1}$). Наибольшее количество солнечной радиации видимого диапазона за весь летний сезон (июнь–август) поступило в поверхностный слой средней части Баренцева моря в 2015 г. — 2805 Эйншт. м^{-2} , совсем немного отстал 2016 г. — 2795 Эйншт. м^{-2} , а в 2014 г. — только 2565 Эйншт. м^{-2} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua позволило провести для средней части Баренцева моря количественные расчеты солнечной радиации видимого диапазона (ФАР), поступающей на поверхность моря и проникающей на разные глубины, а также оценить влияние на эти процессы таких важных для рассматриваемого региона факторов, как облачность и кокколитофоридные цветения.

Как и ожидалось, облачность оказалась главным фактором, влияющим на поступающую ФАР: при одном и том же значении ФАР на верхней границе атмосферы (примерно 56 Эйншт. м^{-2} сут $^{-1}$) значения дневной экспозиции на поверхности моря изменялись, в зависимости от облачности, почти в 5 раз — от менее 10 до 45 Эйншт. м^{-2} сут $^{-1}$.

Кокколитофоридные цветения оказывают заметное влияние на проникновение ФАР в водную толщу, так как кокколитофориды и отделившиеся кокколиты сильно рассеивают солнечное излучение и увеличивают альбедо водной толщи. В рассматриваемом случае альбедо составляло меньше 1% при отсутствии цветения и возрастало почти до 8% при концентрации кокколитофорид около 2.6 млн кл/л (не самое сильное цветение).

Исследование выполнено за счет гранта РФФИ № 14-17-00800, предоставленного через Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН.

Подготовка аппаратуры для судовых измерений спектральных величин поверхностной и подводной облученности выполнена за счет гранта РФФИ № 14-50-00095, предоставленного Институту океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вазюля С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Артемьев В.А. Оценка по спутниковым данным показателей поглощения окрашенного органического вещества и диффузного ослабления солнечного излучения в водах Белого и Карского морей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 31–41.
2. Еришова С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Метод оценки проникновения солнечного излучения в воды арктических морей на основе спутниковых данных: случай сплошной облачности // Океанология. 2002. Т. 42. № 1. С. 22–31.

3. *Ершова С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. и др.* Метод оценки проникновения видимого и ультрафиолетового солнечного излучения в воды арктических морей на основе спутниковых данных: случай безоблачной атмосферы // *Океанология*. 2001. Т. 41. № 3. С. 335–343.
4. *Зега Э.П., Иванов А.П., Кацев И.Л.* Рассеяние света при освещении среды бесконечно протяженным источником // *Перенос изображения в рассеивающей среде*. М.: Наука и техника, 1985. С. 25–55.
5. *Копелевич О.В., Буренков В.И., Вазюля С.В. и др.* Оценка баланса ФАР в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS // *Океанология*. 2003. Т. 43. № 6. С. 834–845.
6. *Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И. и др.* Оценка объемного поглощения солнечного излучения в водной толще по спутниковым данным // *Фундаментальные исследования океанов и морей* / Ред. Лаверов Н.П. Кн. 1. М.: Наука, 2006. С. 109–126.
7. *Balch W.M., Gordon H.R., Bowler B.C. et al.* Calcium carbonate measurements in the surface global ocean based on Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer data // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. C07001, doi 10.1029/2004JC002560
8. *Gordon H.R.* Can the Lambert–Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // *Limnol. Oceanogr.* 1989. V. 34. № 8. P. 1389–1409.
9. *Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Artemiev V.A.* Estimation of sea surface solar radiation at 400–700 nm using satellite ocean color data, and its validation by ship data // *Optics Express*. 2016. V. 24. № 6. P. A604–A611.
10. *Zhang J., Spitz Y.H., Steele M. et al.* Modeling the impact of declining sea ice on the Arctic marine planktonic ecosystem // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. C10015, doi 10.1029/2009JC005387

Penetration of Visible Solar Radiation into Waters of the Barents Sea Depending on Cloudiness and Coccolithophore Blooms

O. V. Kopelevich, S. V. Vazyulya, A. V. Grigoriev, A. N. Khrapko, S. V. Sheberstov, I. V. Sahling

A quantitative estimation of penetration of the solar radiation in the visible spectrum range 400–700 nm (PAR) have been performed in the Middle Barents on the basis of satellite and in situ data in the summer season 2014–2016. The effects of cloudiness and coccolithophore blooms, observed in the Barents Sea in July–September almost every year, on the incident and underwater solar radiation were investigated. The estimation of the impact of changes in the PAR on the sea surface temperature was made. This estimation showed that the PAR influence is most pronounced (as compared with a main factor – advection of warm Atlantic water by the Norwegian current) in July and August in the clear sky conditions.