

**Подводное световое поле в
поверхностном слое Баренцева моря
и спектральный коэффициент
яркости водной толщи
при различных океанологических
условиях**

Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Вазюля С.В.

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

ВВЕДЕНИЕ

В работе Kореlevich et al. (2020) выполнены теоретические расчеты различными методами параметров подводного светового поля для Баренцева моря при различных океанологических условиях, в частности, наличии или отсутствии кокколитофоридных цветений. Расчеты проводились для наборов оптических характеристик, полученных по данным экспедиционных измерений и соответствующих реальным ситуациям. Исследуется связь между параметрами светового поля и спектральными коэффициентами яркости водной толщи, анализируется точность используемых приближенных формул.

Строго говоря, термин «световые поля» определяется как полное описание углового распределения яркости излучения в данной точке, но в представляемом докладе мы рассматриваем ограниченную задачу, т.е. только излучение, направленное к поверхности моря, которое определяет спектральный коэффициент яркости водной толщи, который оценивается по данным спутниковых сканеров цвета.



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В нашей работе мы не ставили перед собой задачу воспроизвести результаты натурных измерений посредством численного моделирования; мы использовали эти результаты для приближения входных параметров моделирования к реальным условиям, наблюдаемым в Баренцевом море.

Институт океанологии им. П.П. Ширшова проводит регулярные комплексные экспедиции в Баренцевом море с 2014 года. За этот период было проведено пять рейсов: июль – август 2014 и 2015 гг., июнь – июль 2016 г., июнь – август 2017 и 2018 гг. Практически во всех этих экспедициях проводились комплексные оптические измерения с одновременным спутниковым наблюдением за цветом океана (при благоприятных погодных условиях). Оптические измерения сопровождалась гидрологическими и биогеохимическими исследованиями. Полученные результаты демонстрируют эффективность комплексного подхода к использованию оптических методов, сочетающих точность судовых измерений и полное покрытие исследуемой акватории космическими снимками (Glukhovets et al., 2017).

Рейс 2017 г. оказался наиболее плодотворным: измерения проводились и на дрейфовых станциях и непрерывно на ходу судна с помощью проточной системы. На дрейфовых станциях измерялись вертикальные профили температуры и показателя ослабления света посредством погружаемого прозрачномера, отбирались пробы воды с выбранных горизонтов для лабораторных определений спектров флуоресценции ОРОВ и пигментов фитопланктона, спектров поглощения морской воды, фильтратов и взвешенных частиц. С помощью проточной системы непрерывно измерялись флуоресценция хлорофилла и ОРОВ, температура и соленость.

Комплекс световых измерений, выполнявшийся в светлое время суток, включал измерения спектрального состава солнечного излучения, выходящего из водной толщи, с помощью плавающего спектрорадиометра, поверхностной и подводной ФАР посредством прибора Li-COR, спектральных величин поверхностной и подводной облученности приборами ВІС и RAMSES.

При благоприятных погодных условиях были получены спутниковые данные MODIS, OLCI и VIIRS.



В качестве опорных значений для входных параметров моделирования световых полей в Баренцевом море мы взяли данные, полученные на станции 5580 к северу от Кольского полуострова (70.14 °с.ш., 35.27 ° в.д.), рейса АМК-68 2017. Мы измерили не все параметры, необходимые для численных расчетов. Тем не менее, наших измерений было достаточно, чтобы получить остальные параметры, используя соответствующие модели.

Данные измерений вторичных оптических характеристик, таких как спектральный коэффициент яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, и коэффициент диффузного ослабления $K_d(\lambda)$, позволили нам рассчитать значения первичных оптических характеристик.

Для расчета подводных световых полей использовались численные методы: метод дискретных ординат (модифицированная программа DISORT) и Монте-Карло. Последний метод применим к любому пространственному распределению оптических характеристик, но требует много машинного времени для расчета.



Наши численные расчеты были выполнены, в основном, методом дискретных ординат. Для проверки полученных результатов в отдельных случаях использовался метод Монте-Карло. В качестве примера на рис. 1 показаны результаты такого сравнения результатов расчета подводной яркости методами Монте-Карло и DISORT.

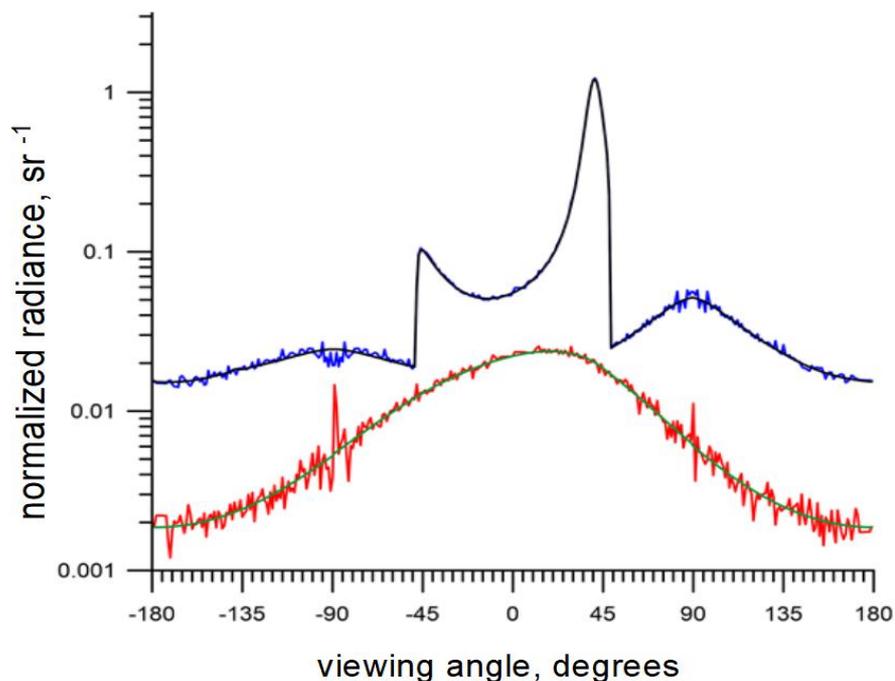


Рис. 1. Сравнение результатов расчета яркости методом Монте-Карло и дискретных ординат. $N_{\text{соч}} = 5 \cdot 10^6$ кл/л, длина волны 410 нм, глубина 0 и 4 м. Красная и синяя линии представляют результаты Монте-Карло; черная и зеленая - DISORT.



РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты наших расчетов позволяют получить полезную информацию для спутниковых наблюдений за цветом океана, в частности об эффекте цветения кокколитофорид.

В качестве примера на рисунке 2 показано распределение яркости в плоскости солнца в зависимости от угла обзора θ . Восходящее излучение соответствует углам от -180° до -90° и от 90° до 180° .



$$\alpha(440) = 0.18 \text{ м}^{-1}$$

$$\alpha(440) = 0.53 \text{ м}^{-1}$$

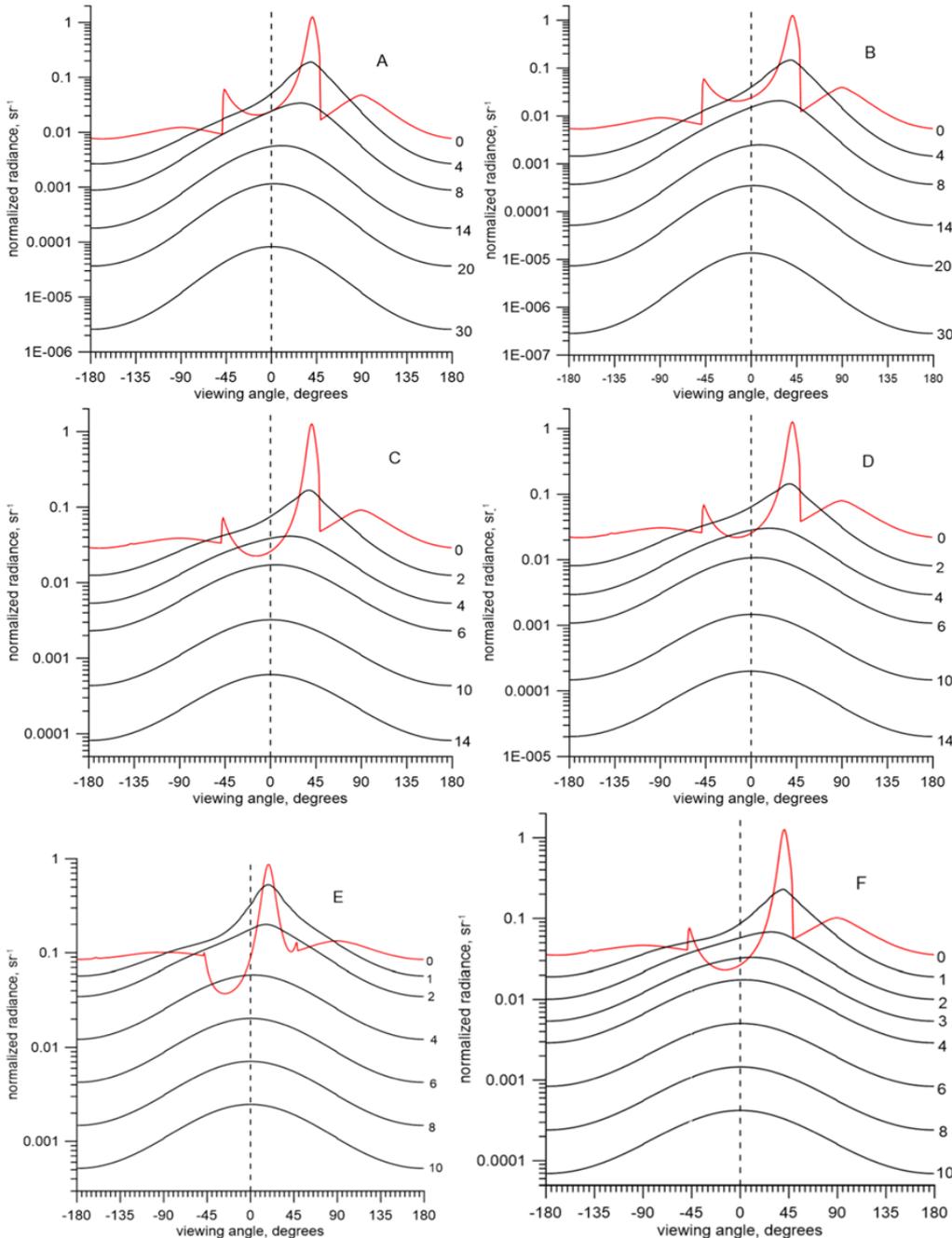


Рис. 2. Распределение яркости в плоскости солнца в зависимости от угла обзора θ (диапазон положительных значений θ соответствует азимутальному углу обзора $\varphi=0^\circ$, отрицательные значения $\varphi=180^\circ$; нисходящее излучение в диапазоне от -90° до $+90^\circ$, восходящее от -180° до -90° и от 90° до 180°).

Цифры возле кривых показывают глубину в метрах. Зенитный угол солнца 60° , $\lambda = 530 \text{ нм}$, скорость ветра 0 м/с .

Рис. 2 А,В - $N_{\text{cos}} = 0$,
С, D - $5 \cdot 10^6$ клеток/л,
Е, F - 10^7 клеток/л.



На рис. 3 показаны спектральные значения $\rho(\lambda)$, полученные численным расчетом. Мы рассматриваем изменения $\rho(\lambda)$ для двух случаев спектрального поглощения : $\alpha(440) = 0.18 \text{ м}^{-1}$ и 0.53 м^{-1} .

Два варианта условий наблюдения: ясное небо , зенитный угол Солнца $\theta_0 = 60^\circ$ и сплошная облачность. Как видно, коэффициент яркости моря при $\theta_0 = 60^\circ$ больше, чем при сплошной облачности. Разница максимальна при $N_{\text{coc}} = 0$ и $\alpha(440) = 0.18 \text{ м}^{-1}$, но даже в этом случае не превышает 6%.

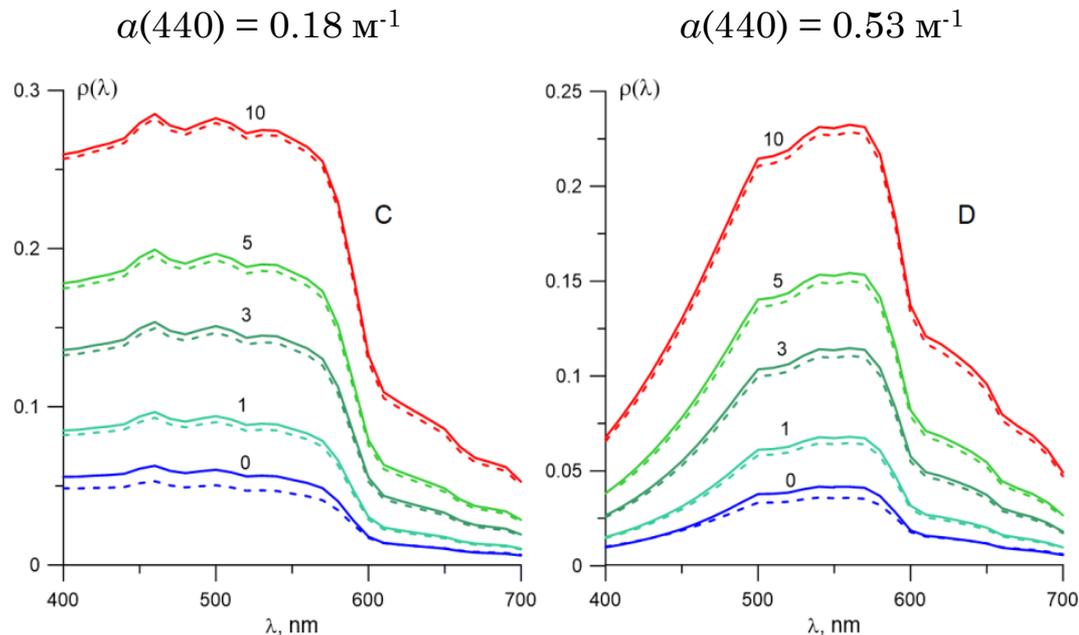


Рис. 3. Спектральные значения $\rho(\lambda)$ для различных концентраций кокколитофорид в Баренцевом море. Сплошные линии – ясное небо, $\theta_0 = 60^\circ$; пунктирные линии – сплошная облачность. Цифры возле кривых означают $N_{\text{coc}}, 10^6$ кл/л.



Для отслеживания изменения формы спектров $\rho(\lambda)$ в зависимости от N_{coc} , мы использовали отношение $\rho(490)/\rho(550)$; что близко к параметрам, которые используются в алгоритмах обработки ОС2М и КД2М для данных MODIS (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/>). В таблице 1 представлены полученные результаты. Данные таблицы 1 соответствуют изменениям в спектрах $\rho(\lambda)$ на рисунке 3.

Как видно, не зависимо от поглощения ($a(440) = 0.53 \text{ м}^{-1}$ и 0.18 м^{-1}) отношение $\rho(490)/\rho(550)$ слабо зависит от N_{coc} и изменяется не более чем на 6%. Эти результаты указывают на необходимость выбора другого параметра.

Таблица 1. Изменение отношения $\rho(490)/\rho(550)$ в зависимости от концентрации N_{coc} . Ясное небо, $\theta_0 = 60^\circ$.

$N_{\text{coc}}, 10^6 \text{ клеток/л}$	0	1	3	5	10
$a(440) = 0.18 \text{ м}^{-1}$	1.10	1.08	1.06	1.05	1.04
$a(440) = 0.53 \text{ м}^{-1}$	0.82	0.81	0.82	0.84	0.82



ПРИБЛИЖЕННЫЕ ФОРМУЛЫ

Мы оценили точность четырех приближенных формул, позволяющих рассчитать коэффициент яркости моря $\rho(\lambda) = \pi L_u(\lambda, 0^-) / E_d(\lambda, 0^-)$ через параметр $u = b_b / (a + b_b)$. Простейшая из них (Morel, Gentili, 1993) была получена для океанских вод первого типа, $u < 0.3$.

$$\rho(u) = \pi \cdot 0.0922 u / (1-u) \quad (1)$$

Ли с соавторами (Lee et al., 1998) вывели формулу с помощью моделирования для бесконечно глубокой прибрежной воды с сильным рассеянием, $u < 0.6$.

$$\rho(u) = \pi (0.070 + 0.155 u^{0.752}) u \quad (2)$$

Формула [Gordon et al., 1988] была получена для океанских вод первого типа, $u < 0.3$.

$$\rho(u) = \pi (0.0949 + 0.0794 u) u \quad (3)$$

Формула (Lee et al., 2002) - модификация формулы (3), пригодная для использования как для прибрежных, так и для океанских вод

$$\rho(u) = \pi (0.089 + 0.1245 u) u \quad (4)$$



На рис. 4 представлены графики $\rho(\lambda)$ согласно формулам (1–4). Видно, что все формулы (1–4) очень близки между собой для $u \leq 0.25$, когда $\rho(\lambda) \leq 0.1$, заметное различие появляется только для $u \geq 0.2$. Для больших значений параметра u , соответствующих высокой концентрации кокколитофорид, формула (1) дает невероятно большие значения ρ ; формулы (2) и (4) - аналогичные результаты; по формуле (3) получаются наименьшие значения ρ .

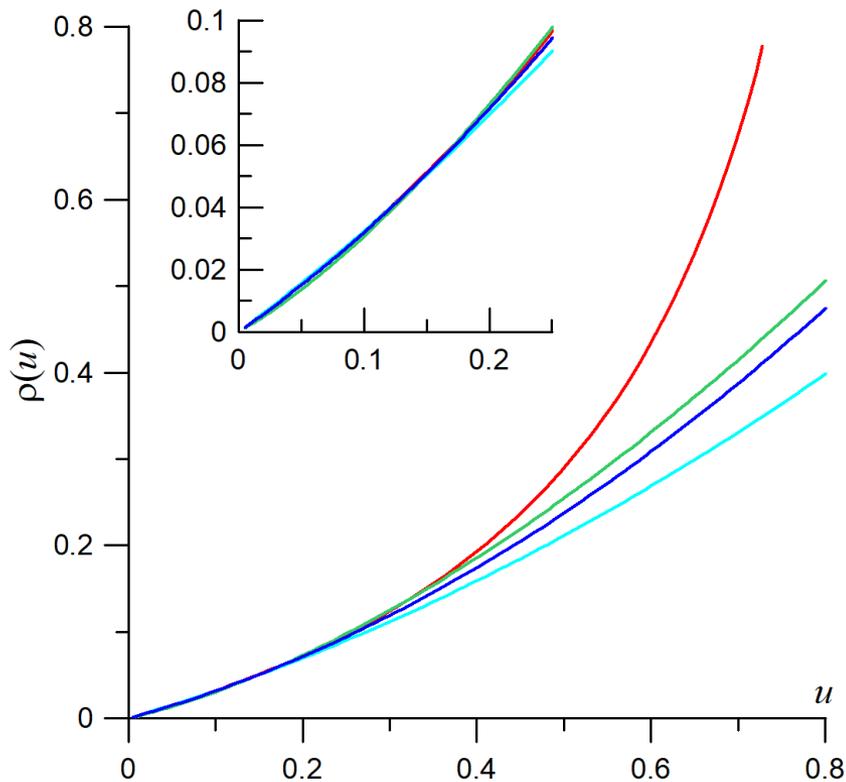


Рис. 4. Величины $\rho(\lambda)$ согласно формулам (1–4). Красная линия - формула (1); зеленая - (2); голубая - (3); синяя - (4).



Для оценки точности формул (1–4) в условиях кокколитоформдного цветения было проведено численное моделирование зависимости ρ от N_{coc} . Мы установили максимальную допустимую абсолютную ошибку 0.01 для $\rho \leq 0.1$ ($u \leq 0.25$) и допустимую относительную погрешность 10% для $\rho > 0.1$ ($u > 0.25$).

Следует отметить, что все формулы (1–4) не зависят от зенитного угла солнца θ_0 ; разница между значениями ρ в различных атмосферных условиях весьма незначительна. На рис. 5 представлены относительные погрешности формул (1–4) для Баренцева моря в зависимости от параметра u при $u \geq 0.25$, для различных значений коэффициента поглощения, с учетом «некокколитофоридного» рассеяния частиц и без него. Мы оценили относительные ошибки (1–4) для длины волны 530 нм, выполнив численное моделирование для N_{coc} от 0 до 10^7 клеток/л.



Значения относительной погрешности $(\rho_{\text{appr}} - \rho)/\rho$ показаны на вертикальной оси, где ρ - результат численного моделирования, а ρ_{appr} вычисляется по одной из формул (1–4).

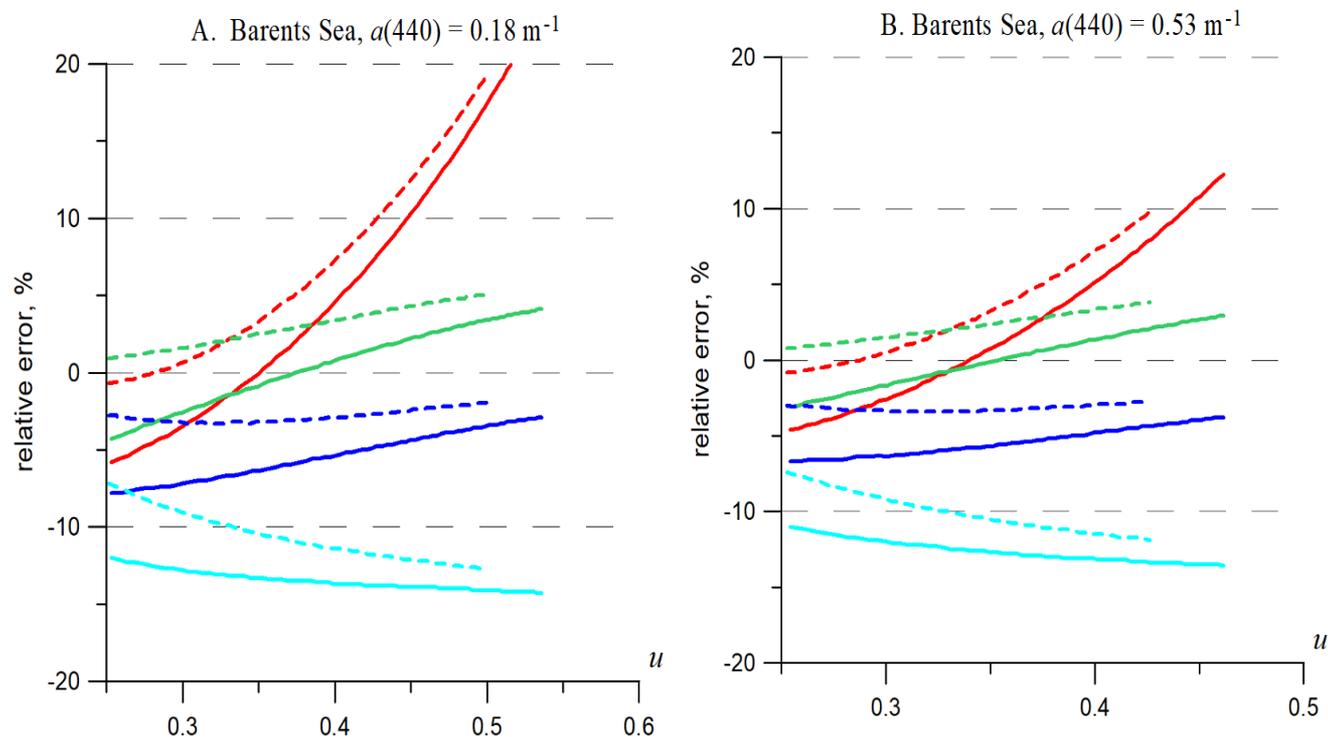


Рис. 5. Относительные погрешности формул (1–4) в зависимости от параметра u с учетом «некокколитофоридных» частиц (штриховые линии) и без него (сплошные линии). Цвет кривых такой же, как на рисунке 4.



На рисунке 5 минимальное значение $u = 0.25$ соответствует $\rho = 0.1$, так как мы устанавливаем допустимую относительную ошибку (10%) для $\rho > 0.1$. Максимальные значения параметра u получены при $N_{\text{coc}} = 10^7$ кл/л, и они намного больше в случае меньшего поглощения.

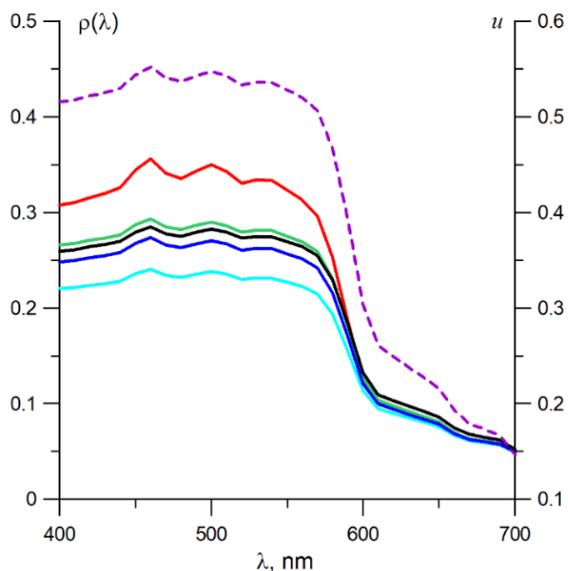
Видно, что формулы (2) и (4) дают приемлемую ошибку для всех рассматриваемых случаев, в отличие от формул (1) и (3). Мы объясняем это тем, что формулы (2) и (4) получены для сильно рассеивающих вод.

В случае $u < 0.25$ все формулы дают ошибку меньше 0.01, и можно использовать любую из них.



На рис. 6 показаны результаты сравнения спектральных значений $\rho(\lambda)$, полученных при численном моделировании, с оценками по формулам (1–4) для Баренцева моря, так же для сравнения показаны результаты для Черного моря.

А. Баренцево море



Б. Черное море

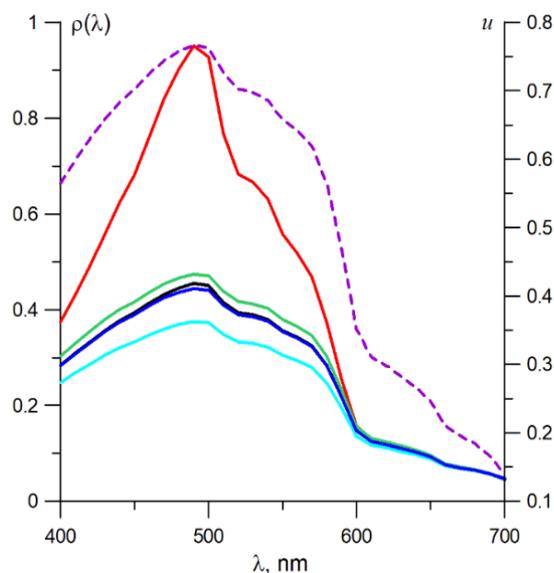


Рис.6. Спектральные значения $\rho(\lambda)$, полученные для $N_{\text{coc}} = 10^7$ кл/л численным моделированием (черные кривые) и по приближенным формулам (цвет кривых соответствует рис. 4), в сравнении с параметром u (фиолетовые пунктирные линии и ось справа).

(А) Баренцево море, $a(440) = 0.18 \text{ м}^{-1}$, $\theta_0 = 60^\circ$;

(Б) Черное море, $a(440) = 0.09 \text{ м}^{-1}$, $\theta_0 = 25^\circ$.



При наличии кокколитофоридного цветения, даже не столь интенсивного ($N_{\text{coc}} = 1 \times 10^6$ кл/л, $u = 0.34$), влияние зенитного угла солнца ослабевает и получаются приемлемые значения относительных ошибок по формулам (1–2, 4). Для $N_{\text{coc}} \geq 3 \cdot 10^6$ кл/л, $u > 0.5$ хорошее приближение получается только по формулам (2) и (4), независимо от зенитного угла солнца.

Обобщая результаты наших расчетов, можно сделать вывод, что при $u \leq 0.25$ любая формула (1–4) позволяет оценить ρ с точностью не хуже 0.01. При $u > 0.25$ формулы (2) или (4) дают точность не хуже 10%; при $u > 0.5$ формула (4) более надежна.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы изучили влияние интенсивного кокколитофоридного цветения на подводные световые поля, которые дают наиболее полную информацию о распространении солнечного излучения в толще воды. Для моделирования подводных световых полей и их основных параметров в условиях экстремального кокколитофоридного цветения создано программное обеспечение и наборы входных параметров, соответствующие реальным условиям Баренцева моря. Мы использовали модифицированный вариант DISORT и метод Монте-Карло, чтобы получить точные данные численных расчетов. Оценка точности аппроксимирующих формул на наших точных данных позволяет дать рекомендации по выбору оптимального алгоритма в условиях интенсивного кокколитофоридного цветения.



ЛИТЕРАТУРА

- *Kopelevich, O.; Sheberstov, S.; Vazyulya, S.* Effect of a Coccolithophore Bloom on the Underwater Light Field and the Albedo of the Water Column // *J. Mar. Sci. Eng.* **2020**, 8, 456. <https://doi.org/10.3390/jmse8060456>
- Glukhovets, D.I.; Kopelevich, O.V.; Sahling, I.V.; Artemiev, V.A.; Pautova, L.A.; Lange, E.K.; 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* **2017**, 57, 410–418, doi:10.1134/S0001437017020059.
- Morel, A.; Gentili, B. Diffuse reflectance of oceanic waters. Bidirectional aspects. *Appl. Opt.* **1993**, 32, 6864–6879, doi:10.1364/AO.30.004427.
- Lee, Z.; Carder, K.L.; Mobley, C.D.; Steward, R.G.; Patch, J.S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semianalytical model. *Appl. Opt.* **1998**, 37, 6329–6338, doi:10.1364/AO.38.003831.
- Gordon, H.R.; Brown, O.B.; Evans, R.H.; Brown, J.W.; Smith, R.C.; Baker, K.S.; Clark, D.K. A semianalytic radiance model of ocean color. *J. Geophys. Res. Space Phys.* **1988**, 93, 10909–10924, doi:10.1029/JD093iD09p10909.
- Lee, Z.; Carder, K.L.; Arnone, R.A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Appl. Opt.* **2002**, 41, 5755–5772, doi:10.1364/AO.41.005755.



БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект №19-55-45024 ИНД_а)

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

