

Валидация формул расчета показателя диффузного ослабления по спутниковым данным при наличии кокколитофоридного цветения

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

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

Солнечное излучение видимого диапазона (400-700 нм) – фотосинтетически активная радиация (ФАР) – способно проникать в водную толщу.

Для расчета затухания солнечного излучения с глубиной используют экспоненциальный закон и показатель диффузного ослабления K_d :

$$E_d(z) = E_d(0^-) \exp[-K_d z].$$

Величина K_d сильно зависит от длины волны и угловой структуры подводного светового поля.

Формулы для расчета K_d

В работе протестировано три формулы:

$$K_o = 1.04 D_o (a + b_b) \quad (1)$$

формула Гордона (1989) для K_d под поверхностью моря ($z = 0$);

$$\langle K_d \rangle = c D_o \sum_{n=1}^3 \langle k \rangle_n \left[\frac{a+b_b}{c} \right]^n \quad (2)$$

для расчета $\langle K_d \rangle$, среднего для фотического слоя (Gordon, 1989);

$$\langle K_d \rangle = (1+0.005 \theta_o) a + 3.47 b_b \quad (3)$$

простая формула для фотического слоя (Lee et al., 2005).

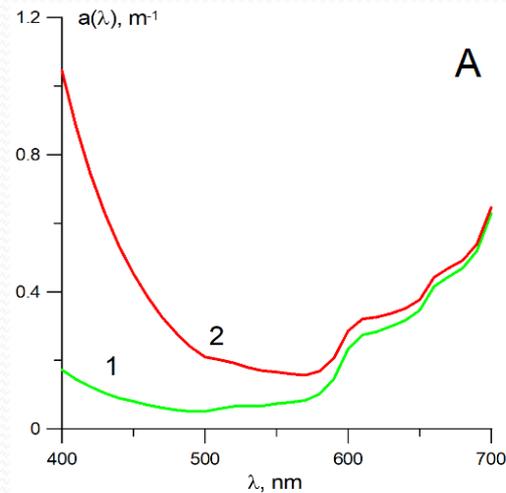
Где a , c и b_b - показатели поглощения, ослабления и рассеяния назад, D_o - параметр, зависящий от высоты Солнца и доли диффузного излучения в общем потоке излучения, θ_o - зенитный угол Солнца.

Численное моделирование

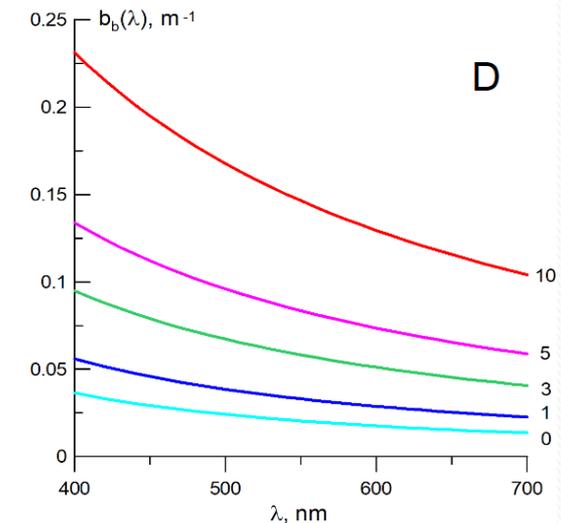
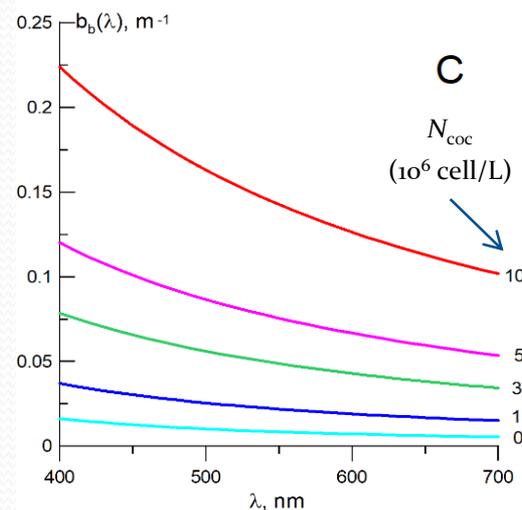
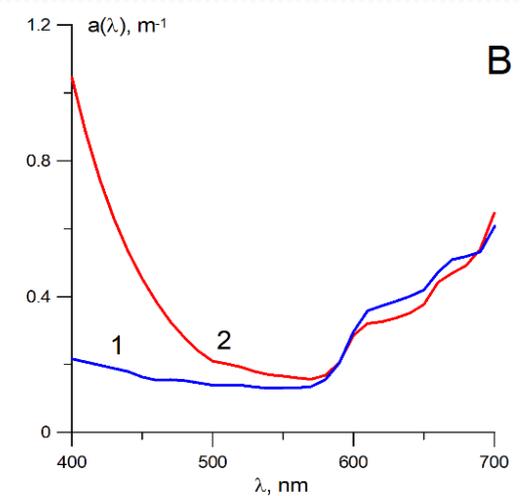
Точность формул при наличии кокколитофоридного цветения (Korelevich et al., 2020) была проверена по результатам численного моделирования методом дискретных ординат (Stamnes, Swanson, 1981; Stamnes et al., 1988).

Параметры для моделирования выбирались на базе натуральных и спутниковых измерений биооптических характеристик Баренцева и Черного морей.

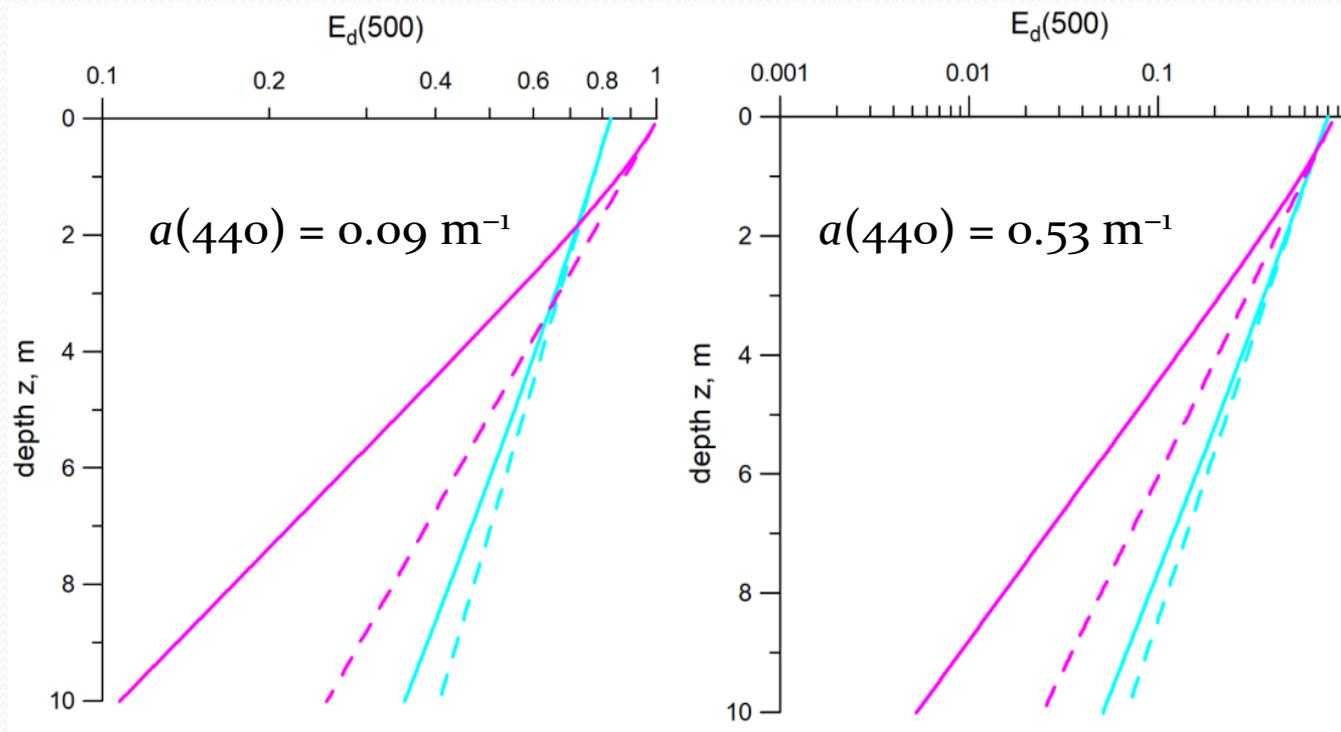
Черное море



Баренцево море



Даже для однородного слоя воды величина K_d зависит от глубины!

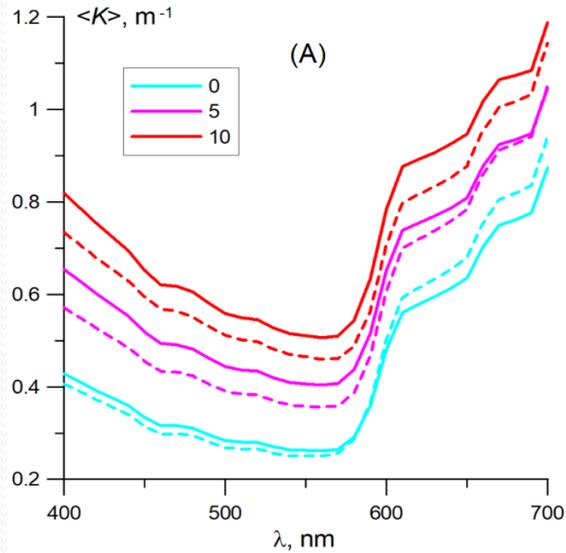


Профили нисходящей облученности в зависимости концентрации кокколитофорид ($N_{\text{coc}} = 0$, голубые линии; $N_{\text{coc}} = 5 \times 10^6 \text{ cell/L}$, розовые). Сплошной линией показаны результаты численного моделирования, пунктиром – при условии $K_d = K_0 = \text{const}$.

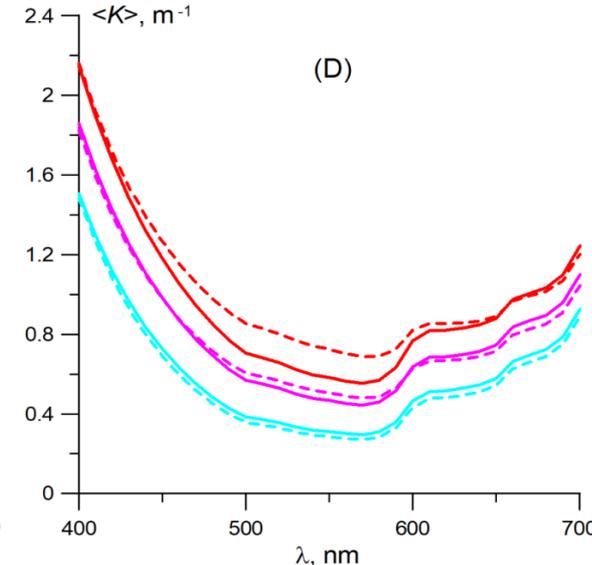
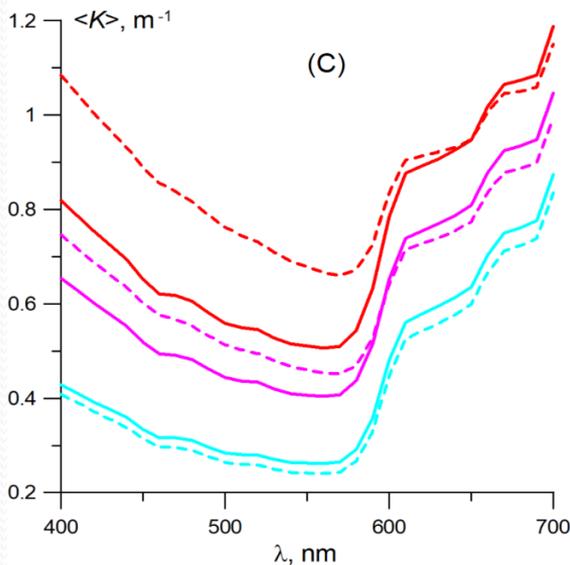
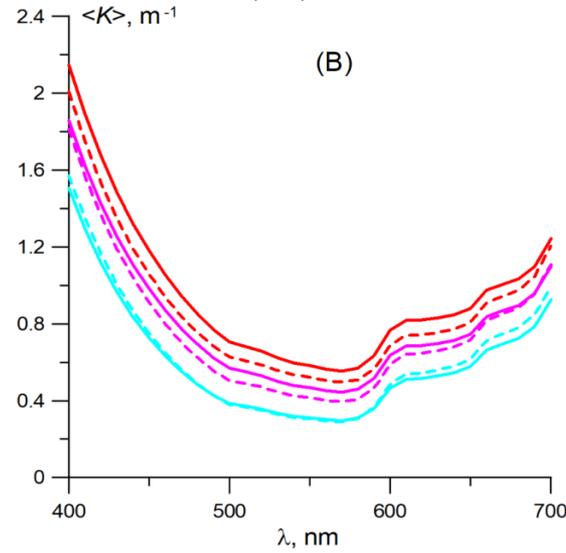
Абсолютные ошибки формул (1-3) в зависимости от концентрации кокколитофид N_{coc} , зенитного угла солнца θ_0 , показателя поглощения

$a(440)$	0.09				0.53			
θ_0	25			60	25			60
λ, nm	(3)	(2)	(1)	(3)	(3)	(2)	(1)	(3)
$N_{coc} = 0$								
400	-0.004	-0.010	-0.032	-0.002	0.018	-0.008	0.032	0.039
500	-0.001	-0.012	-0.024	-0.003	0.000	-0.001	-0.019	-0.009
550	-0.003	-0.007	-0.021	-0.007	-0.001	0.000	-0.017	-0.010
600	0.004	0.004	-0.011	-0.010	0.007	0.004	-0.007	-0.010
700	0.029	0.001	0.017	-0.009	0.030	0.001	0.018	-0.009
$N_{coc} = 5 \cdot 10^6 \text{ cell/L}$								
400	0.11	-0.09	-0.16	0.11	-0.001	-0.08	-0.22	0.01
500	0.13	-0.03	-0.07	0.13	0.05	-0.08	-0.15	0.04
550	0.09	-0.05	-0.08	0.09	0.05	-0.07	-0.12	0.04
600	0.03	-0.07	-0.13	0.01	0.02	-0.07	-0.13	0.002
700	0.02	-0.03	-0.11	-0.03	0.02	-0.03	-0.11	-0.03
$N_{coc} = 10 \cdot 10^6 \text{ cell/L}$								
400	0.30	-0.11	-0.20	0.30	0.04	-0.20	-0.43	0.05
500	0.32	-0.004	-0.06	0.31	0.16	-0.12	-0.21	0.16
550	0.23	-0.04	-0.10	0.23	0.15	-0.10	-0.18	0.14
600	0.10	-0.11	-0.19	0.08	0.08	-0.12	-0.21	0.06
700	0.03	-0.09	-0.21	-0.02	0.03	-0.09	-0.21	-0.02

$a(440) = 0.18 \text{ m}^{-1}$



$a(440) = 0.53 \text{ m}^{-1}$



Спектральные величины показателя $\langle K_d \rangle$ в зависимости от величины N_{coc} (10^6 cell/L), в условиях безоблачного неба, $\theta_0 = 60^\circ$.
Сплошной линией - результаты численного моделирования, пунктиром - по приближенным формулам.

A, C, $a(440) = 0.18 \text{ m}^{-1}$;
B, D, $a(440) = 0.53 \text{ m}^{-1}$.

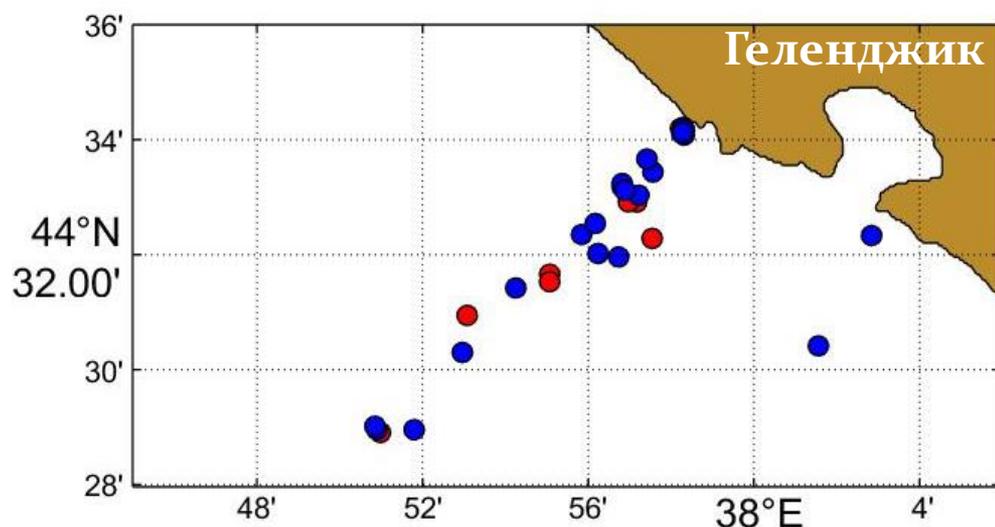
A, B, формула (2);
C, D, формула (3).

Численное моделирование - выводы

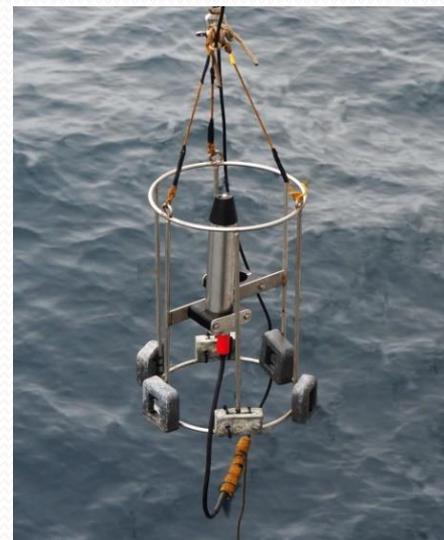
- При отсутствии кокколитофоридного цветения можно использовать любую формулу (1-3).
- В случае кокколитофоридного цветения, если поглощение не слишком мало ($b_b \leq 0.5 a$), хорошую точность обеспечивает простая формула (3).
- В случае же сильного рассеяния и малого поглощения лучше использовать формулу (2), но для этого необходимо знать отношение показателя рассеяния назад к общему показателю рассеяния (b_b/b).

Валидация по натурным данным

Также были использованы величины K_d , рассчитанные по данным натурных измерений в Геленджикском районе Черного моря в 2017-2018 гг. Причем в 2017 г. в районе исследований наблюдалось самое мощное кокколитофоридное цветение за всю историю наших спутниковых наблюдений с 1998 г. (Копелевич и др., 2018), а в 2018 г. цветение практически отсутствовало.



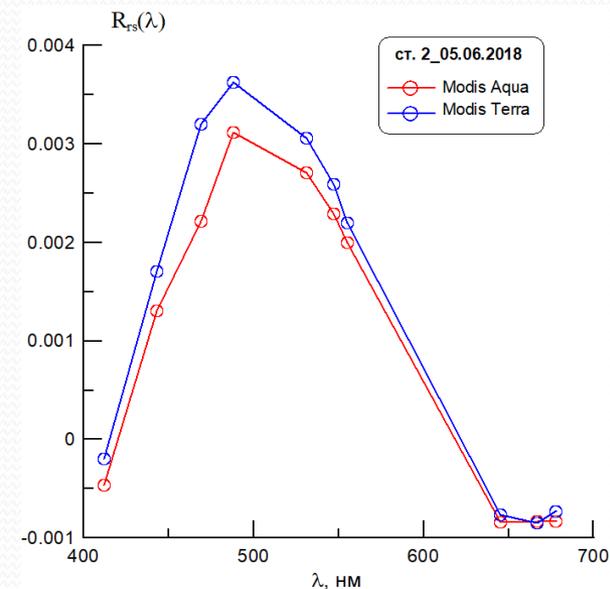
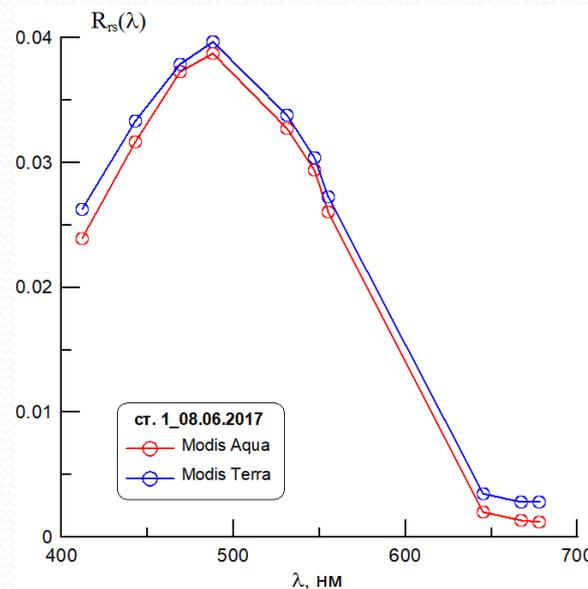
Карта расположения станций в июне 2017 (синие кружочки) и 2018 (красные)



Многоспектральный измеритель подводной облученности Ramses ACC-VIS (TRIOS)

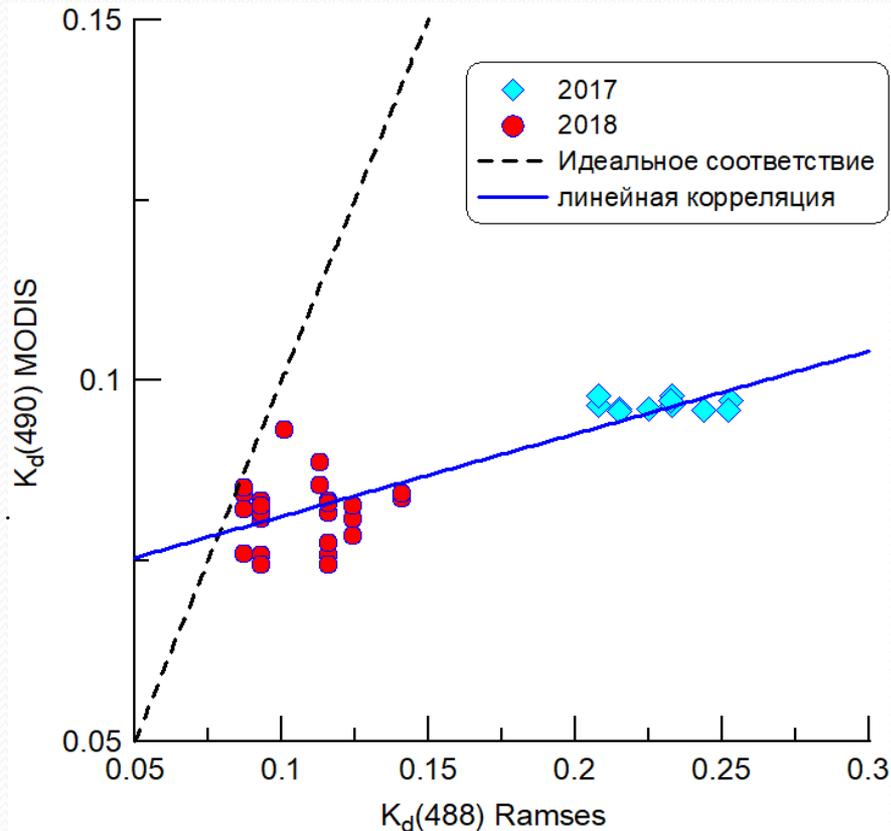
Для определения первичных оптических характеристик морской воды использовались спектры коэффициента яркости моря по данным сканера цвета MODIS (временной интервал между спутниковыми и натурными измерениями не превышал 24 часов, всего 37 спектров) и полуаналитическая модель с фиксированными значениями спектрального наклона поглощения желтым веществом и рассеяния назад взвесью. При этом использовались спектральные каналы 443-555 нм, где минимальны ошибки атмосферной коррекции.

Наглядно видна разница между спектрами в 2017 и 2018 гг. – величина $R_{rs}(\lambda)$ при наличии кокколитофоридного цветения возрастает на порядок!



Примеры спектров $R_{rs}(\lambda)$ по данным MODIS

Стандартный алгоритм НАСА



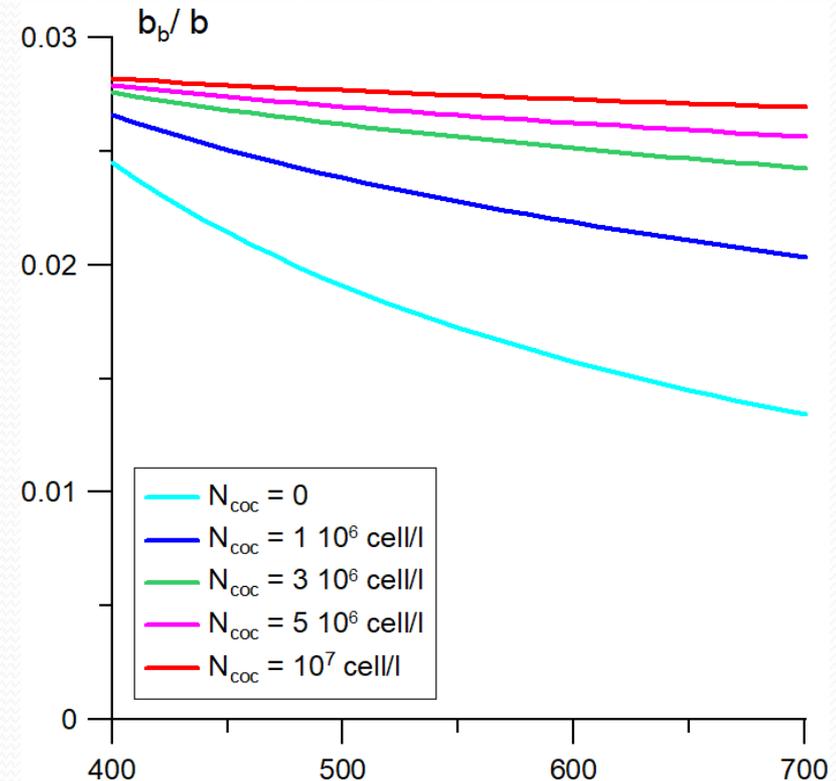
Сопоставление величин K_d , рассчитанных по измерениям in situ и по данным MODIS (стандартный алгоритм НАСА)

Спутниковые величины K_d всегда заметно меньше, чем натурные, но особенно велико это различие в 2017г. в присутствии сильного кокколитофоридного цветения – величины K_d по данным измерений Ramses примерно в 2.5 раза больше, чем рассчитанные стандартным алгоритмом НАСА по данным MODIS.

Чтобы использовать формулу (2), надо знать не только a и b_b , но и отношение b_b/b .

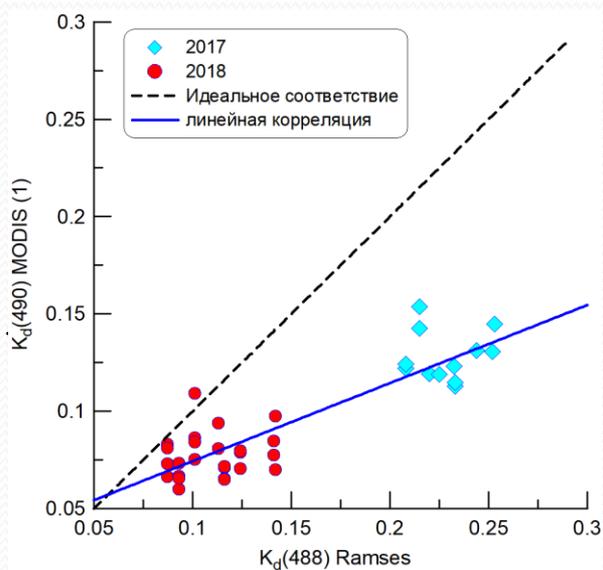
Согласно данным модельных расчетов (Kopelevich et al., 2020) при интенсивном цветении b_b/b слабо зависит от длины волны, при $N_{\text{coc}} = 5$ и 10 (10^6 кл/л) b_b/b варьирует в пределах 0.026-0.028. При отсутствии цветения b_b/b заметно ниже и довольно сильно изменяется в видимом диапазоне от 0.013 при 700 нм до 0.0245 при 400 нм.

В наших расчетах для 2017 г. использовались b_b/b , полученные в модели с $N_{\text{coc}} = 5 \cdot 10^6$ кл/л, а для 2018 г. – $N_{\text{coc}} = 0$.

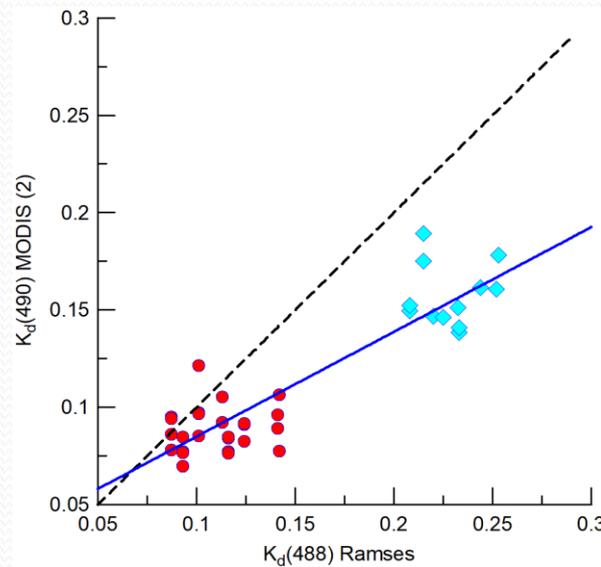


Отношение b_b/b в зависимости от длины волны и концентрации кокколитофорид N_{coc} , полученное для модели Черноморских вод (Kopelevich et al., 2020).

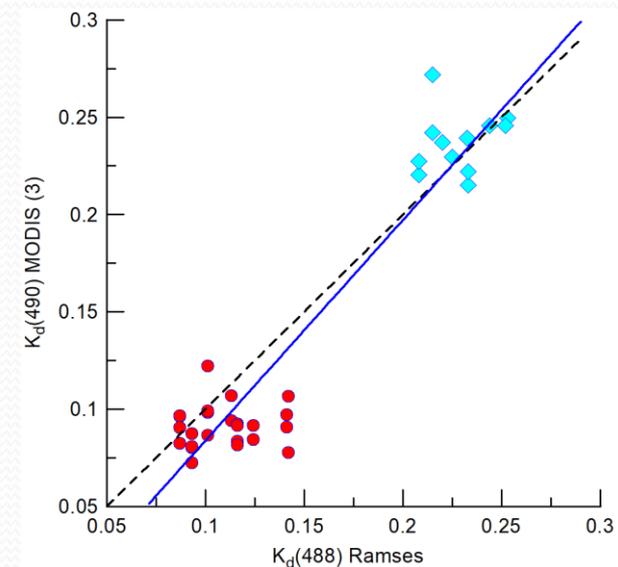
Сравнение $K_d(490)$, рассчитанного по данным MODIS и формулам (1-3), с $K_d(488)$ по данным натуральных измерений



формула (1)



формула (2)



формула (3)

Валидация для $K_d(490)$ показала, что формула (1) дает сильно заниженные оценки для 2017 г. (почти в 2 раза), когда наблюдалось интенсивное цветение. Величины, вычисленные по формуле (3), очень хорошо соответствуют результатам натуральных измерений: коэффициент детерминации 0.90, средняя относительная ошибка 15%. Оценки по формуле (2) лучше совпадают с данными измерений, чем оценки по формуле (1), но не так хорошо, как по формуле (3).

Оптические характеристики, полученные для ст. 1_08.06.2017 в Черном море по данным натурных и спутниковых измерений. На этой станции было максимальное значение $N_{\text{coc}} = 8.2 \cdot 10^6$ кл/л. Из таблицы видно, что спутниковые данные позволяют с хорошей точностью оценить не только спектр поглощения, но и диффузного ослабления, если использовать формулу (3).

λ , нм	Первичные характеристики			K_d				Относительные ошибки K_d , %		
	a^* ICAM	a SA	b_b SA	Ramses	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
443	0.077	0.089	0.050	0.30	0.16	0.19	0.27	48	36	9
490	0.050	0.058	0.044	0.22	0.11	0.14	0.22	49	37	2
555	0.074	0.075	0.036	0.22	0.12	0.15	0.21	45	33	7
625	0.273	0.292	0.031	0.52	0.35	0.40	0.43	32	23	16

* a ICAM – показатель поглощения измеренный ICAM, a и b_b SA – показатели поглощения и рассеяния назад, полученные по данным MODIS при помощи полуаналитической модели

Выводы

Таким образом, валидация как по результатам численного моделирования, так и по данным натурных измерений показала, что при наличии сильного кокколитофоридного цветения (высоких значениях показателя рассеяния назад) для расчета показателя диффузного ослабления лучше всего использовать простую формулу (3) для фотического слоя (Lee et al., 2005).

Благодарность

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

Литература

- Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. <https://optics.ocean.ru/>
- Gordon, H.R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // *Limnol. Oceanogr.* **1989**, 34, 1389–1409.
- *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>
- Lee, Z.-P.; Du, K.-P.; Arnone, R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance // *J. Geophys. Res.* **2005**, 110, 02016.
- Stamnes, K.; Swanson, R.A. A new look at the discrete ordinate method for radiative transfer calculations in anisotropically scattering atmospheres. // *J. Atmos. Sci.* **1981**, 38, 387–398.
- Stamnes, K.; Tsay, S.-C.; Wiscombe, W.; Jayaweera, K. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media // *Appl. Opt.* **1988**, 27, 2502–2509.

Спасибо за внимание!

Буду рада ответить на ваши вопросы

Вазюля Светлана

svershova@mail.ru