

УДК 551.465

© С.В.Вазюля, О.В.Копелевич, 2012

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

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург

svershova@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ БАЛАНСА ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ РАДИАЦИИ В БАРЕНЦЕВОМ, БЕЛОМ, КАРСКОМ И ЧЕРНОМ МОРЯХ ПО ДАННЫМ СУДОВЫХ И СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Представлены сравнительные оценки основных составляющих баланса фотосинтетически активной радиации (ФАР) (падающей, отраженной и вышедшей из водной толщи) и объемного поглощения солнечного излучения в приповерхностном слое в Баренцевом, Черном, Карском и Белом морях по данным судовых и спутниковых измерений. Оптические свойства вод значительно различались, в частности, показатель диффузного ослабления подводной облученности $K_d(555)$ изменялся приблизительно от 0.13 м^{-1} до 0.42 м^{-1} . Эти различия обуславливали существенную разницу в составляющих баланса ФАР в разных морях. Совпадение оценок характеристик проникновения солнечной радиации по судовым и спутниковым данным в приповерхностном слое вполне удовлетворительное.

Ключевые слова: фотосинтетически активная радиация, баланс ФАР, спутниковые данные.

Солнечное излучение видимого диапазона – фотосинтетически активная радиация (ФАР) – способно проникать в водную толщу. Баланс ФАР на поверхности моря и в водной толще зависит от условий освещения и оптических свойств морской воды. Его количественная оценка имеет большое значение для исследования утилизации солнечного излучения при создании первичной продукции фитопланктона, а также влияния объемного поглощения в водной толще на термическую структуру и теплосодержание поверхностного слоя. Для выполнения такой оценки необходимы данные о величинах ФАР, падающей на поверхность моря, восходящей от поверхности и проникающей на различные глубины в водной толще. Такие измерения в судовых экспедициях проводятся редко, однако для этой цели можно использовать данные спутниковых измерений, которые позволяют, в частности, оценить пространственную и временную изменчивость утилизируемой ФАР, исследовать влияние на нее различных факторов.

В Лаборатории оптики океана ИОРАН создан комплекс алгоритмов для расчета по данным спутниковых сканеров цвета основных составляющих баланса ФАР (падающая, отраженная и вышедшая из водной толщи) на уровне поверхности моря [1] и оценки объемного поглощения солнечного излучения в приповерхностном слое [2, 3]. Применимость разработанных алгоритмов для морей высоких широт была показана на примере Баренцева моря [1]. Ошибки расчета составляющих баланса ФАР, по данным спутниковых сканеров цвета, в основном обусловлены неточностью входных параметров расчета из-за ошибок атмосферной коррекции спутниковых данных [3].

Ниже даны сравнительные оценки баланса ФАР в Баренцевом, Черном, Карском и Белом морях по данным судовых и спутниковых измерений. Судовые измерения были проведены в Баренцевом море в рейсах НИС «Академик Сергей Вавилов», август 1998 г., в Карском и Белом морях в рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш», сентябрь 2007 г., и в Черном море в рейсе НИС «Академик Профессор Штокман», март 2009 г. Более подробная информация приведена в табл.1. Все натурные измерения выполнены

при безоблачном небе и высоте Солнца меньше 40° . Оптические свойства вод варьировались в широком диапазоне: от чистых вод с показателем диффузного ослабления подводной облученности сверху $K_d(555) \approx 0.13 \text{ м}^{-1}$ до очень мутных в Белом море ($K_d(555) = 0.42 \text{ м}^{-1}$) и Баренцевом море на станции 1112 ($K_d(555) = 0.35 \text{ м}^{-1}$).

Таблица 1

Станции, использованные для сравнительных оценок баланса ФАР

Море	Станция	Дата	Координаты	Зенитный угол солнца, градус	$K_d(555)$, м^{-1}
Баренцево	1112	19.08.1998	69.09°с.ш., 58.29°в.д.	67.6	0.35
	1131	24.08.1998	69.77, 56.28	63.3	0.13
Белое	4939	01.09.2007	65.75, 38.73	76.8	0.42
Карское	4956	11.09.2007	71.25, 65.84	66.6	0.12
Черное	2	09.03.2009	43.37, 36.7	51.0	0.13

Методика измерений и расчетов. Судовые измерения. Натурные измерения в Баренцевом море проводились в основном посредством УФ-ФАР-радиометра, измерявшего поверхностную и подводную облученность в видимом и ультрафиолетовом спектральных диапазонах. Эти данные ранее уже были использованы для проверки методики оценки баланса ФАР [1–3].

В Белом, Карском и Черном морях посредством измерителя светового режима на поверхности и в водной толще E -метра [4]. Измерялись облученность сверху на поверхности моря $E_d(0^+)$ и подводная облученность в зависимости от глубины z (нисходящая $E_d(z)$ и восходящая $E_u(z)$) в четырех спектральных каналах: 443, 490, 555, 625 нм. По этим данным определялись величина облученности сверху, непосредственно под поверхностью моря $E_d(0^-)$ и показатель диффузного ослабления подводной облученности K_d для вышеуказанных длин волн. Методика измерений и расчета этих величин описана в работе [4]. Затем с помощью специально разработанных алгоритмов рассчитывались спектральные величины облученности на поверхности и непосредственно под поверхностью, показатель диффузного ослабления подводной облученности, подводных облученностей сверху и снизу на разных глубинах во всем диапазоне ФАР. Ошибка расчета спектральных величин поверхностной облученности составляет около 10 %, показателя диффузного ослабления подводной облученности – 6 % [4].

Спутниковые наблюдения. Для расчетов использовались: значения спектральной яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренные спутниковыми сканерами цвета SeaWiFS (Баренцево море) и MODIS-Aqua (Белое, Карское, Черное моря); сопутствующие параметры, входящие в комплект спутниковых данных и необходимые для проводимых расчетов (такие, например, как содержание озона и скорость ветра). Данные получены из архива GSFC DAAC (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>).

Для расчетов использовались ранее выведенные формулы [1–3], для спектральных величин подводной облученности сверху $E_d(z)$ – экспоненциальный закон ослабления с глубиной:

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

где для простоты длина волны λ опущена.

Величина $E_d(0^-)$ вычислялась исходя из предположения об отсутствии поглощения при прохождении излучения через поверхность:

$$E_d(0^+) - E_{ref} - E_w = E_d(0^-) - E_u(0^-). \quad (1)$$

Здесь E_{ref} и E_w – облученности снизу над поверхностью, создаваемые соответственно отраженным и вышедшим из водной толщи потоками излучения; $E_u(0^-)$ – облученность снизу, непосредственно под поверхностью воды. Алгоритмы расчета величин $E_d(0^+)$ и E_{ref} , E_w по спутниковым данным подробно описаны в [1].

Величина $E_u(z)$ рассчитывалась через величину $E_d(z)$ посредством соотношения

$$E_u(z) = R \cdot E_d(z), \quad (2)$$

где R – коэффициент диффузного отражения водной толщи.

Предполагается, что величина R не зависит от глубины и рассчитывается через спектральный коэффициент яркости моря ρ :

$$R = \rho \cdot Q/\pi. \quad (3)$$

Значения Q для различных спектральных каналов в зависимости от высоты солнца и концентрации хлорофилла можно найти в [5].

Из формул (1) и (2) следует:

$$E_d(0^-) = [E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w] / [1 - R],$$

где R рассчитывается по формуле (3).

Объемное поглощение в водной толще $E_{\text{abs}}(\Delta z)$ вычисляется исходя из баланса чистой энергии в рассматриваемом слое $\Delta z = z_2 - z_1$:

$$E_{\text{abs}}(\Delta z) = E_d(z_1) - E_d(z_2) + E_u(z_2) - E_u(z_1),$$

где $E_d(z_1)$, $E_d(z_2)$ – величины подводной облученности сверху на горизонтах z_1 и z_2 ; $E_u(z_2)$, $E_u(z_1)$ – величины облученности снизу на этих горизонтах.

Спектральный коэффициент яркости моря ρ определяется в результате атмосферной коррекции спутниковых данных. Полуаналитический биооптический алгоритм [6] позволяет по спектральным значениям ρ рассчитать спектральные показатели поглощения a и рассеяния назад b_b морской воды. Затем вычисляется величина K_d по формулам [7]

$$K_d = 1.04 D_0 (a + b_b),$$

$$D_0 = (1 - g) / \cos \theta_{0w} + 1.197 g,$$

где θ_{0w} – угол преломления прямых солнечных лучей, g – доля диффузного излучения в общем потоке излучения, падающего на поверхность. Последняя величина определяется по результатам расчетов прохождения солнечного излучения в атмосфере – спутниковые данные.

При расчете дневных экспозиций параметры атмосферы и воды предполагались неизменными в течение всего дня; учитывалось лишь изменение высоты солнца [1]. При этом через каждый час рассчитывались мгновенные спектральные величины поверхностной облученности $E_d(0^+)$, потоков отраженного E_{ref} и вышедшего из-под поверхности излучения E_w , а также подводной облученности на различных горизонтах $E_d(z)$ и поглощенного излучения в разных слоях $E_{\text{abs}}(\Delta z)$ с разрешением 20 нм в диапазоне ФАР (400–700 нм). Результаты затем интегрировались по спектру и по времени, чтобы получить значения дневных экспозиций всех величин.

Таблица 2

Сравнение величин дневных экспозиций ФАР на поверхности моря, рассчитанных по алгоритму НАСА и ИОРАН

Море	НАСА		ИОРАН		Различие, %
	Эйнштейн м ⁻² сут ⁻¹	МДж м ⁻² сут ⁻¹	Эйнштейн м ⁻² сут ⁻¹	МДж м ⁻² сут ⁻¹	
Белое (ст.4939)	32.4	7.03	33.3	7.23	2.7
Карское (ст.4956)	21.8	4.73	22.4	4.86	2.6

Значения дневных экспозиций ФАР на поверхности моря рассчитываются так же, как стандартный продукт обработки данных спутниковых сканеров цвета, и доступны через Интернет (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). В табл.2 сравниваются результаты расчетов по алгоритму НАСА и ИОРАН для станций в Белом и Карском морях; величины ФАР представлены как квантовая (Эйнштейн м⁻² сут⁻¹), так и энергетическая

(МДж м⁻² сут⁻¹) облученности. Для перевода первых во вторые использовался коэффициент 4.6 МДж/Эйнштейн (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/seawifs_par_wfigs.pdf).

Как видно из табл.2, совпадение расчетов по разным алгоритмам очень хорошее.

Результаты измерений и расчетов баланса ФАР. На рис.1 представлены результаты измерений облученности сверху для четырех каналов Е-метра в Белом море (ст.4939) в сравнении с аналогичными данными, измеренными тем же прибором в Карском море (ст.4956). На рисунке хорошо видно, что облученность в Белом море для всех длин волн уменьшается гораздо более резко, чем в Карском. Наблюдаемые различия связаны в первую очередь с более сильным поглощением солнечного излучения в водах Белого моря, которое обусловлено высоким содержанием окрашенного органического вещества («желтое вещество»).

На рис.2 показано изменения с глубиной спектральных распределений подводной облученности, рассчитанных по результатам измерений *in situ* в Белом и Карском морях. Видно, как в Белом море с глубиной резко «обрезается» коротковолновая часть спектра, и уже на глубине 15 м прошедшее солнечное излучение фактически находится в желто-зеленом интервале спектра 520–630 нм.

На рис.3 представлены результаты сравнения профилей спектральной облученности сверху $E_d(z)$, измеренных *in situ* и рассчитанных по спутниковым данным для ст.2 в Черном море.

На рис.4 сравниваются результаты расчетов величин нисходящей ФАР в зависимости от глубины по данным измерений *in situ* и по спутниковым данным в момент проведения натурных измерений. Числа у кривых показывают различия между спутниковыми и натурными оценками ФАР у поверхности и на наибольшей глубине измерения. Совпадение этих оценок можно признать удовлетворительным, учитывая различия между данными в точке (натурные измерения) и, усредненными по площади пикселя (спутниковые данные).

В табл.3 представлены результаты оценки глубин 1% и 0.1%-ной ФАР, относительно падающей на поверхность по данным спутниковых и *in situ* измерений в различных морях.

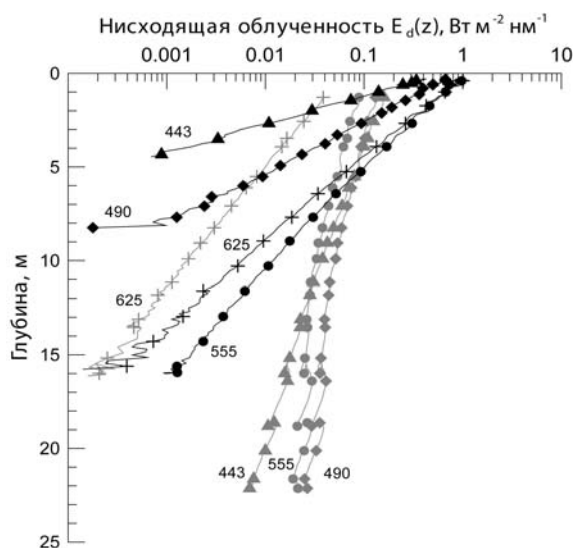


Рис.1. Вертикальное распределение нисходящей облученности, измеренное в водах Белого (ст.4939, темные значки) и Карского (ст.4956, светлые значки) морей.

В обоих случаях глубина моря свыше 25 м. Данные нормированы на облученность, измеренную на поверхности моря $E_d(0^+)$. Цифры у кривых – значения длин волн, на которых проводились измерения.

Таблица 3

Глубина (в м) ФАР по данным спутниковых и *in situ* измерений в различных морях

Море	1%-ная ФАР		0.1%-ная ФАР	
	спутниковые данные	данные измерений	спутниковые данные	данные измерений
Белое (ст.4939)	7	8.8	11.2	14.5
Карское (ст.4956)	25.3	32.2	40.5	51
Черное (ст.2)	26.3	29	42.1	45.7

Как видно из табл.3, для глубин 1%- и 0.1%-ной ФАР в Черном и Карском морях получились близкие значения и сильно отличающиеся от оценок для Белого моря. Как уже указывалось выше, наблюдаемые различия связаны в первую очередь с более сильным поглощением солнечного излучения в водах Белого моря, обусловленным высоким со-

держанием окрашенного органического вещества (желтое). Следует отметить, что различия между значениями, полученными по спутниковым и натурным измерениям, не превышают 25 % в Белом море и меньше 10 % в Черном.

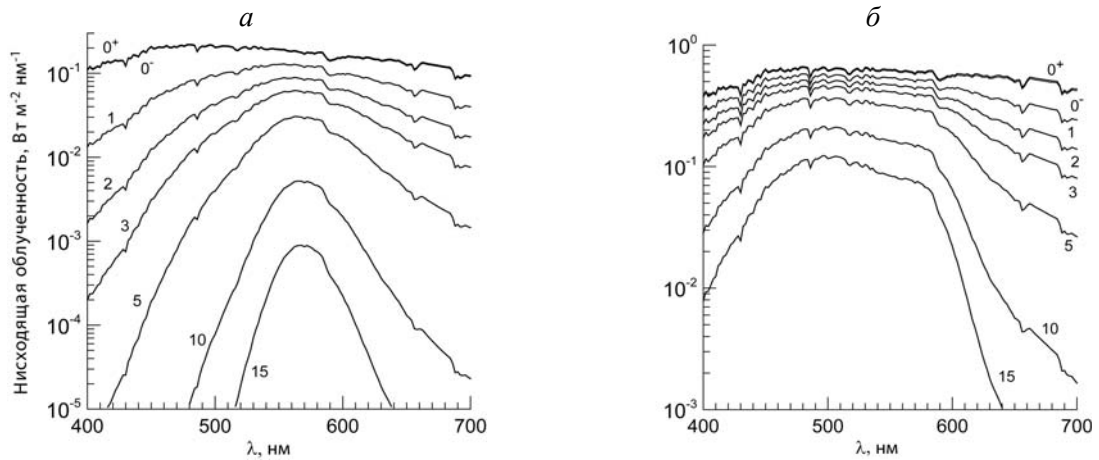


Рис.2. Спектральная облученность, создаваемая нисходящим потоком, на разных горизонтах, рассчитанная по результатам измерений в Белом (а, ст.4939) и Карском (б, ст.4956) морях.

Цифры у кривых – номера горизонтов.

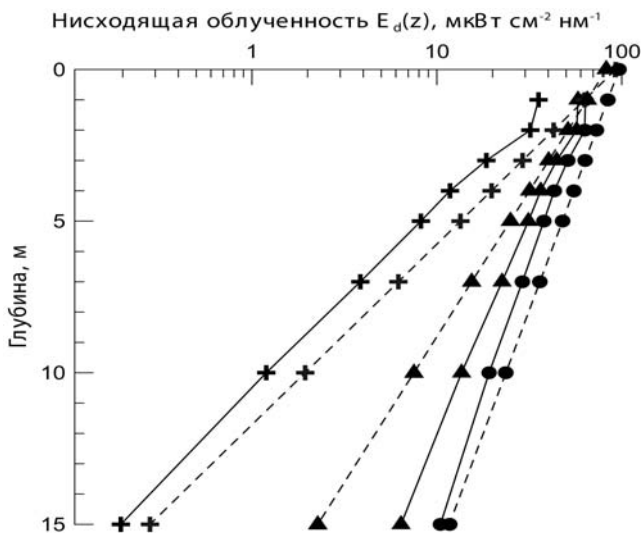


Рис.3. Спектральные величины облученности в Черном море (ст.2).

Сплошные линии – измеренные значения, штриховые – рассчитанные по спутниковым данным. Кружки – 555, ромбики – 443, крестики – 625 нм.

В табл.4 представлены результаты расчетов дневных экспозиций составляющих баланса ФАР по спутниковым данным на различных станциях. Для сравнения даны среднемесячные значения в августе 2000 г. [3].

В табл.5 представлены величины суммарного альбедо и его составляющих, обусловленных отраженным от поверхности излучением (альбедо поверхности моря) и вышедшим из воды излучением (альбедо водной толщи) для разных морей. Анализируя представленные результаты, следует отметить очень низкие значения альбедо водной толщи в Белом море на ст.4939 – всего 0.12 %. Для сравнения – среднее значение этой составляющей альбедо в средней части Баренцевого моря равнялось 1.1 %, а в районах кокколитофоридного цветения превышало 4 % [3].

Другая интересная особенность – высокие значения альбедо поверхности моря Карского (более 11 %). Такие значения возникают из-за очень низкого солнца: высота солнца в Карском море не превышала 23.4° в течение всего дня, тогда как в Белом море максимальное значение высоты солнца было более 32°.

В табл.6 представлены суточные величины поглощенной ФАР в разных слоях для различных морей.

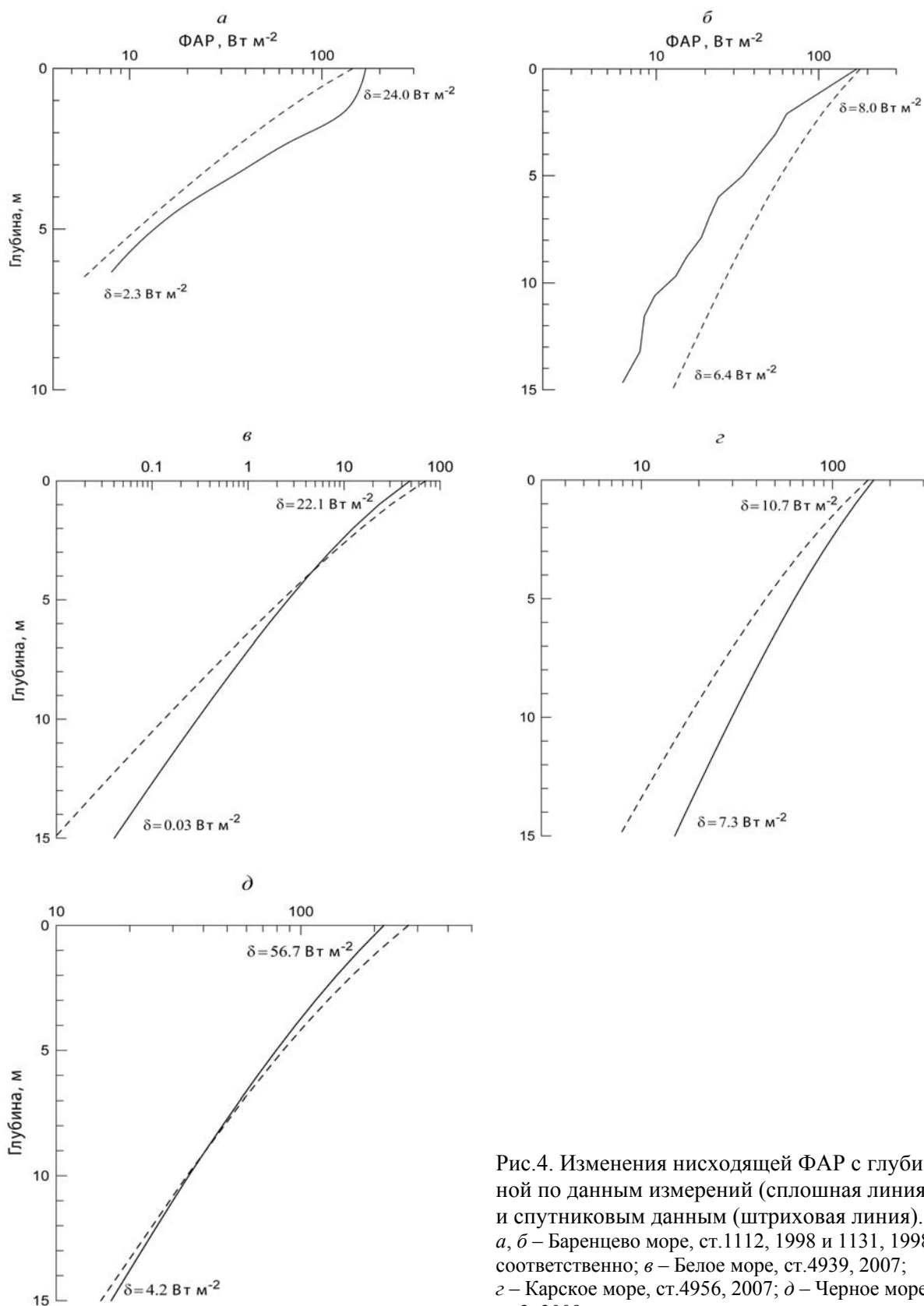


Рис.4. Изменения нисходящей ФАР с глубиной по данным измерений (сплошная линия) и спутниковым данным (штриховая линия). *a, б* – Баренцево море, ст.1112, 1998 и 1131, 1998 соответственно; *в* – Белое море, ст.4939, 2007; *з* – Карское море, ст.4956, 2007; *д* – Черное море, ст.2, 2009.

Как видно из таблицы, практически все солнечное излучение, вошедшее в воду Белого моря, поглощается уже в верхнем 10-метровом слое, что обусловлено сильным поглощением из-за высокой концентрации окрашенного органического вещества.

Таблица 4

Величины дневных экспозиций составляющих баланса ФАР по спутниковым данным на различных станциях и среднемесячные значения в августе 2000 г. [3]

Море	Дневные экспозиции, МДж м ⁻² день ⁻¹				
	ФАР				
	верхняя граница атмосферы	падающая	отраженная	вышедшая	поглощенная
Белое (ст.4939)	12.15	7.23	0.61	0.009	6.61
Карское (ст.4956)	6.46	4.86	0.54	0.020	4.30
Черное (ст.2)	9.49	7.61	0.47	0.066	7.07
Баренцево (ср.ч.) [3]	10.47	4.98	0.28	0.054	4.60
Белое [3]	11.14	6.55	0.39	0.03	6.03

Таблица 5

Величины суммарного альбедо и его составляющих (поверхность моря и водная толща) для разных морей

Море	Альбедо, %		
	суммарное	поверхности моря	водной толщи
Белое (ст.4939)	8.5	8.4	0.12
Карское (ст.4956)	11.5	11.1	0.4
Черное (ст.2)	7.1	6.2	0.9
Баренцево (ср. ч.) [3]	6.7	5.6	1.1
Белое [3]	6.5	6.0	0.46

Таблица 6

Суточные величины поглощенной ФАР (МДж м⁻² день⁻¹) в различных слоях для разных морей

Море	Слой, м					
	0–1	1–2	2–3	3–5	5–10	10–15
Белое (ст.4939)	3.66	1.46	0.70	0.55	0.23	0.01
Карское (ст.4956)	1.11	0.75	0.53	0.68	0.75	0.28
Черное (ст.2)	1.74	1.21	0.87	1.13	1.27	0.47
Баренцево (ср. ч.) [3]	0.93	0.65	0.48	0.65	0.86	0.42
Белое [3]	2.31	1.19	0.72	0.79	0.68	0.20

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ (договор РГТМУ № 11.G34.31.0078) для поддержки исследований под руководством ведущих ученых.

Литература

1. 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
2. Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I. et al. Assessment of underwater irradiance and the absorption of solar radiation at the water column from satellite data // Remote Sensing, Laser Probing, and Imagery in Natural Waters / Eds: I.M.Levin, G.D.Gilbert, C.C.Trees. Proceeding of SPIE V.6615 (SPIE Bellingham, WA, 2007), 661507.
3. Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Вазюля С.В., Набиуллина М.В. Оценка объемного поглощения солнечного излучения в водной толще по спутниковым данным // Фунд. исслед. океанов и морей / Под ред. Н.П.Лаверов. Кн.1. М.: Наука, 2006. С.109–126.
4. Khrapko A.N., Kopelevich O.V., Burenkov V.I. et al. New instrument for measuring surface and underwater irradiances // Proc. of IV Intern.Conf. «Current Problems in Optics of Natural Waters (ONW'2007)». N.Novgorod, 2007. P.271–275.
5. Morel A., Mueller J. Normalized Water-Leaving Radiance and Remote Sensing Reflectance: Bidirectional Reflectance and Other Factors // NASA, TM-2003-211621. Rev.4. V.III. 2003. P.32–59.
6. Burenkov V.I., Ershova S.V., Kopelevich O.V. et al. Semianalytic bio-optical algorithm for case 2 waters // Proc. of Intern. Conf. «Current Probl. in Optics of Nat. Waters». St.Petersburg, 2001. P.79–85.
7. Gordon H.R. Can the Lambert-Beer law be applied to the diffuse attenuation coefficient of ocean water? // Limnol. Oceanogr. 1989. V.34, N 8. P.1389–1409.

