Оценка по спутниковым данным баланса солнечной радиации в видимом диапазоне спектра на поверхности моря и в подповерхностном слое

О.В. Копелевич,

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

Актуальность проблемы

Оценка баланса солнечной радиации в природных водах необходима для исследования двух важных проблем:

- утилизация солнечного излучения при создании первичной продукции фитопланктона;
- влияние объемного поглощения солнечного излучения
 в водной толще на термическую структуру и теплосодержание поверхностного слоя.



The term "shortwave radiation" refers to sunlight at wavelengths ranging from 0.3 to 5 μ m. It comprises the most part of energy emitted by Sun.

Component of a budget of the shortwave solar radiation in the atmosphere-ocean system

(<u>http://www.physicalgeography.net/fundamentals/</u>)



100% = 30% + 19% + 51%

Облученность, создаваемая нисходящим Ed или восходящим Eu потоками солнечного излучения на горизонтальной поверхности

Downwelling irradiance:

$$E_{d} = \int_{0}^{2\pi} d\varphi \int_{0}^{\pi/2} L(\theta, \varphi) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta;$$

Upwelling irradiance:

$$E_u = -\int_0^{2\pi} d\varphi \int L(\theta, \varphi) \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta.$$

Видимая часть коротковолновой солнечной радиации 400-700 нм - это Фотосинтетическая активная радиация ФАР. Она составляет на уровне моря более 40% общего количества коротковолновой солнечной радиации.

$$PAR = \int_{400}^{700} E(\lambda) d\lambda$$

A budget of PAR at the sea surface

 $PAR_{d}(O^{+}) = PAR_{ref} + PAR_{w} + PAR_{d}(O^{-}) - PAR_{u}(O^{-});$

 $PAR_d(0^-) - PAR_u(0^-) = PAR_{abs}$.

"d" – downwelling, "u" – upwelling,

 O^+ - just above the sea surface, O^- - just beneath the sea surface.

 $PAR_{d}(0^{+})$ - incident at the sea surface,

- **PAR**_{ref} reflected from the surface,
- PAR_{w} water-leaving PAR,
- *PAR_{abs}* absorbed PAR at the water column.

Спектральная облученность поверхности моря

I. Случай безоблачного неба

Прёхслойная оптогоская людель атлосореры 020K: Toz = koz· DU; Woz = 0 Стратосфера – примерно 20-25 км Pereberar attimocopepa: T_R ; $W_R = 1$; $P_R(\theta)$ примерно до 8 км appozonthal annuocopepa: $\overline{T}_{\alpha}; \quad \omega_{\alpha}; \quad P_{\alpha}(\theta)$ примерно до 1-1.5 км Robep × Hocardo

Расчет спектральной облученности под поверхностью моря

$$E(\lambda) = E_{snun}(\lambda) \cdot (1 - \rho_{snun}) + E_{sky}(\lambda) \cdot (1 - \rho_{sky})$$

$$E_{sun} = S_0 \cdot \cos \theta_0 \cdot T_z \cdot T_a \cdot T_{0z} \cdot T_0 \cdot T_{uv}$$

$$E_{sky} = I_z + I_a$$

$$P_{sun} = P_{sun}^{sp} + P_{f};$$

$$P_{sky} = \rho_{sky}^{sp} + \rho_{f};$$

Gregg W.W., Carder K.L. A simple spectral solar irradiance model for cloudless maritime atmosphere // Limnol. And Oceanography. 1990. V.35. P. 1657-1675.

Составляющие яркости восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеряемой спутниковым сканером цвета

L_t(λ_i) – спектральная яркость восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеряемая спутниковым датчиком:

 $L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i),$

- где $L_r(\lambda_i)$ и $L_a(\lambda_i)$ яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;
- $L_{g}(\lambda_{i})$ и $L_{wc}(\lambda_{i})$ яркости, обусловленные, соответственно, солнечными бликами и диффузным отражением пеной;

 $T(\lambda_i)$ и $t(\lambda_i)$ - •направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой;

 $L_w(\lambda_i)$ – искомая яркость излучения, вышедшего из водной толщи.

Два главных этапа обработки данных спутниковых сканеров цвета

- 1. Атмосферная коррекция определение спектральных значений яркости $L_W(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости $L_t(\lambda_i)$ восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком.
- 2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости $L_W(\lambda_i)$ излучения, вышедшего из водной толщи. В случае мелкого моря с учетом отражения ото дна.

$$L_t(\lambda_i) = L_r(\lambda_i) + L_a(\lambda_i) + T(\lambda_i) \cdot L_g(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_{wc}(\lambda_i) + t(\lambda_i) \cdot L_w(\lambda_i),$$

 $\boldsymbol{L}_{a}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) + \boldsymbol{t}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) \cdot \boldsymbol{L}_{w}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) = \boldsymbol{L}_{t}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) - \boldsymbol{L}_{r}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) - [T(\boldsymbol{\lambda}_{i}) \cdot \boldsymbol{L}_{g}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) + \boldsymbol{t}(\boldsymbol{\lambda}_{i}) \cdot \boldsymbol{L}_{wc}(\boldsymbol{\lambda}_{i})].$



(AErosol RObotic NETwork) is an optical ground based aerosol monitoring network. The network hardware consists of identical automatic sun-sky scanning spectral radiometers. The data provide globally distributed near real time observations of aerosol spectral optical depths and aerosol size distributions. They used for algorithm validation of satellite aerosol retrievals and as well as for characterization of aerosol properties that are unavailable from satellite sensors.

Сравнение суточных изменений величины поверхностной облученности (Вт·м⁻²) в Баренцевом море, измеренных и рассчитанных по данным SeaWiFS (безоблачное небо).



<u>П</u>унктирная кривая – данные расчетов; сплошная - измерение контрольным фотометром, точечная - надводным радиометром.

Значения суммарной облученности на поверхности (Вт·м⁻²·нм⁻¹) в трех спектральных диапазонах по данным расчетов и измерений УФ-ФАР радиометром (Баренцево море)

Спектральный	Ст.	1112	Ст.1131		
диапазон	расчет	измерения	расчет	измерения	
УФ-Б	0.47	0.34	0.70	0.42	
УФ-А	18.2	25.8	22.8	27.1	
ФАР	161	187	195	186	

СЛУЧАЙ СПЛОШНОЙ ОБЛАЧНОСТИ

Четырехслойная атмосфера:

озоновый слой, рэлеевская атмосфера над облаком, облачный слой и рэлеевский слой под облаком.

$$\begin{aligned} r_{cl}(\tau_{cl},\mu,\mu_0,\varphi) &= r_0(\mu,\mu_0,\varphi) - X \cdot g(\mu_0) \cdot g(\mu) \\ t_{cl}(\tau_{cl},\mu,\mu_0,\varphi) &= X \cdot g(\mu_0) \cdot g(\mu) \\ r_0(\mu,\mu_0,\varphi) &\approx 0,49(1+4\mu\mu_0)/(\mu+\mu_0), \\ X &= \frac{4q}{\tau_{cl}+4q} \\ g(\mu) &\approx 3(1+2\mu)/7 \end{aligned}$$

Зеге Э.П. и др. Рассеяние света при освещении среды бесконечно протяженным источником // в кн. "Перенос изображения в расееивающей среде", 1985.

Процент облачности, оптическая толщина и верхняя граница облаков по данным ISCCP для Баренцева моря в августе и сентябре с 1983 по 1993г.

	Процент облачности		Оптическа	я толщина	Верхняя граница облаков, км	
Год	август	сентябрь	август	сентябрь	август	сентябрь
1983	78.5	77.5	6.9 (1.9)	9.3 (3.5)	2.3	1.7
1984	80.2	76.0	6.2 (1.9)	8.0 (2.8)	2.3	2.0
1985	78.7	76.3	8.0 (2.1)	8.7 (3.3)	2.0	2.4
1986	72.4	75.6	6.9 (2.4)	7.7 (4.3)	2.2	2.1
1987	73.6	79.2	6.7 (1.8)	10.7 (5.3)	2.2	1.9
1988	71.7	74.8	7.9 (2.3)	7.4 (3.4)	2.1	2.3
1989	67.4	76.7	7.7 (4.0)	8.4 (1.9)	2.6	2.3
1990	75.3	67.6	9.0 (3.5)	9.3 (4.5)	2.1	2.0
1991	75.1	73.5	9.5 (3.3)	9.2 (2.1)	1.9	2.1
1992	76.8	77.9	8.0 (1.3)	9.1 (2.4)	1.9	2.1
1993	74.1	73.8	7.6 (1.7)	5.6 (3.3)	1.8	2.2
Среднее	74.5 (3.6)	75.4 (3.1)	7.8 (2.4)	8.5 (3.3)	2.1 (0.2)	2.1 (0.2)

Пример сравнения суточных изменений величины поверхностной облученности (Вт·м⁻²) в Баренцевом море, измеренных и рассчитанных по данным SeaWiFS. Облачное небо.



Пример рассчитанного распределения X по данным SeaWiFS от 26 августа 1998 г. в 12:39 местного времени Баренцево море.



Гистограммы распределения значений параметра Х

A - 15.08.98



Практический интерес представляют дневные экспозиции

Б - 26.08.98

Для расчета дневной экспозиции использовалось среднее значение Х в ячейке площадью ~ 280 км²



Рассчитанные и измеренные значения дневной экспозиции для поверхностной облученности (Дж·м⁻²·нм⁻¹) для 555 нм

Дата	Время	Расчет	Измерения	Дата	Время	Расчет	Измерения
измерения	пролета			измерения	пролета		
	SeaWiFS				SeaWiFS		
15.08.98	12:40	432± 91	348	27.08.98	13:24	320±115	225
15.08.98	14:19	416± 91	348	27.08.98	15:03	326±110	225
26.08.98	12:39	333±141	312	10.09.98	13:58	217±87	203
26.08.98	14:18	303±147	312	13.09.98	14:34	176±43	164

Алгоритм для расчета поверхностной облученности по спутниковым данным для безоблачного неба и при наличии облачности



Маршрут 127-го рейса НИС «Профессор Штокман» 26.07.- 06.08.2014 г.



Измеритель светового режима (ИСР) на поверхности моря и в водной толще.



Состоит из двух измерительных модулей: палубного (справа) и подводного (слева), которые одновременно производят измерения облученности в 4-х спектральных диапазонах: 443, 490, 555 и 625 нм с полушириной 10 нм.

Распределения величины дневной экспозиции ФАР, Рассчитанные по данным сканера MODIS-Aqua



Сравнение расчетов пл алгоритму НАСА и ИО РАН 30.07.2014г.

Распределения, рассчитанные для двух пролетов спутника : 10:55 (слева) и 12:35 (справа).



Сравнение значений дневных экспозиций (Эйнштейн/м²·день) по данным судовых измерений и рассчитанных по алгоритмам НАСА и ИО РАН, усредненных по дневному переходу судна.

	Satellite	<u>Cloud</u>	Field	MODIS NASA		MODIS SIO RAS	
Date	time	<u>pixels</u>	data	<dpar></dpar>	error	<dpar></dpar>	error
29.07.2014	12:00	<u>40</u>	43.6	52.5	21%	46.2	6%
31.07.2014	11:50	<u>95</u>	26.9	31.4	17%	26.1	-3%
01.08.2014	10:55	<u>100</u>	17.6	23.3	32%	20.3	15%
01.08.2014	12:35	<u>93</u>	17.6	28.6	62%	26.3	49%
02.08.2014	10:00	<u>100</u>	15.7	16.4	5%	15.5	-1%
02.08.2014	11:40	<u>100</u>	15.7	18.7	19%	17.3	10%
03.08.2014	9:05	<u>75</u>	23.8	28.9	22%	25.4	7%
03.08.2014	10:45	<u>65</u>	23.8	41.2	73%	35.8	51%
04.08.2014	8:10	<u>100</u>	32.6	44.2	35%	39.9	22%
04.08.2014	9:45	<u>97</u>	32.6	42.8	31%	31.9	-2%

Расчет спектральных величин подводной облученности

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

где $E_d(z)$ и $E_d(0^{-})$ – значения облученности сверху на глубине z и непосредственно под поверхностью воды, K_d - показатель вертикального ослабления подводной облученности; все три величины – функции длины волны излучения λ (здесь и далее λ для простоты опущена).

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

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

Здесь $E_u(0^-)$ - облученность снизу непосредственно под поверхностью воды; $E_d(0^+)$ – облученность сверху над поверхностью воды; E_{ref} и E_w – облученности снизу непосредственно над поверхностью воды, создаваемые, соответственно отраженным от поверхности и вышедшим из водной толщи потоками излучения.

Среднемесячное распределение значений показателя вертикального ослабления фотосинтетически активной радиации, м⁻¹ по данным сканера цвета SeaWiFS в августе 2000 г.



Среднемесячные значения дневной экспозиции ФАР (МДж м⁻² день⁻¹) на поверхности моря по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS



Среднемесячные значения альбедо водной толщи в августе 2000 г. по данным сканера цвета SeaWiFS: слева – реальные условия, справа – для моря, заполненного чистой водой.



Относительные величины поглощенной ФАР в слое 2-3 м в августе 2000 г. по данным сканера цвета SeaWiFS: слева – реальные условия, справа – для моря, заполненного чистой водой.



То же для слоя 15-25 м



Расчет потока ФАР, отраженного от взволнованной морской поверхности

$$E_{ref} = (1-p) \left[r_{diff} \cdot E_{diff} + r_{dir} \cdot E_{dir} \right] + p r_{wcap} \cdot (E_{dir} + E_{diff}),$$

где r_{diff} , r_{dir} , r_{wcap} - коэффициенты отражения диффузной и прямой радиации от взволнованной поверхности и коэффициент отражения пены; E_{diff} , E_{dir} - облученность поверхности рассеянным и прямым излучением; p – доля покрытия поверхности пеной.

Коэффициенты отражения r_{diff} и r_{dir} рассчитываются для распределения уклонов Кокса-Манка с учетом затенения.

Коэффициент отражения пены рассчитывается по модели Frouin et al. (1996): $r_{wcap} = r_0 \cdot f(\lambda), \quad r_0 = 0.22 \pm 0.11,$

 $f(\lambda) = 1, 400 \le \lambda \le 600$ нм $f(\lambda) = exp(-\gamma(\lambda - 600)^q), 600 < \lambda < 2000$ нм, $\gamma = 1.75 \cdot 10^{-3} \pm 0.48 \cdot 10^{-3}, q = 0.993 \pm 0.046;$

A=2.95 $\cdot 10^{-6} \cdot V^{3.52} \pm 6.5 \cdot 10^{-3}$ (Monahan and O'Muircheartaigh, 1986) Среднемесячные величины составляющих баланса ФАР в Баренцевом море в августе 2000 г. по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS (МДж м⁻² день⁻¹). Для сравнения даны величины для реальных условий (слева) и для чистой воды (справа)

Регион	Северная часть	Средняя часть	Южная часть	Белое море
Падающее на верхней границе	10.4	10.6	11.0	11.2
атмосферы	10.4	10.0	11.0	11.5
Падающее на поверхности моря	5.00	5.08	5.29	6.66
Отраженное	0.334	0.282	0.290	0.384
Вышедшее из воды	0.037 / 0.085	0.054 / 0.087	0.055 / 0.090	0.032 / 0.111
Падающее под повехностью	4.70 / 4.75	4.84 / 4.89	5.02 / 5.10	6.29 / 6.39
Восходящее под поверхностью	0.094 / 0.173	0.141 / 0.177	0.143 / 0.184	0.082 / 0.229

Солнечная радиация в Арктике

Солнечная радиация, поступающая в фотический слой арктических морей - важнейший фактор, определяющий развитие морских экосистем и создание биоресурсов; в арктических условиях этот фактор большую часть года является лимитирующим.

Одна из важнейших задач в условиях изменяющегося климата – исследование воздействия изменяющихся климатических условий в Арктике на изменение количества солнечной радиации, проникающей в поверхностный слой вод арктических морей России, и на создание первичной биопродукции в процессе фотосинтеза.

Солнечная радиация (ФАР): зависимость от облачности и кокколитофоридных цветений



Величины дневной экспозиции ФАР на поверхности Баренцева моря (нижние) 3 и 4 августа 2014 г. в зависимости от распределения параметра облачности X (верхние рисунки), рассчитанных по данным MODIS-Aqua/ 17.11.2016 Изменение параметра облачности *X* (пунктир) и величины дневной экспозиции ФАР (Эйншт./м²/сут.) на поверхности Баренцева моря (сплошная линия) на широтном разрезе по 71.5° с.ш. 3 августа 2014 г.





Влияние КЦ на проникновение ФАР в воды поверхностного слоя Баренцева моря.



Верхний рисунок – распределение концентрации кокколитофорид;

Нижний – ФАР на глубине 5 м (кружочки); концентрация N_{coc} ромбики); Альбедо водной толщи, % (крестики).

Влияние изменений приходящей ФАР на температуру поверхности моря



Среднемесячные распределения SS1 (слева и ФАР (справа) в Баренцевом море в июне – июле 2016 г.



Изменение среднемесячных значений ФАР (Эйншт./м²/сут, кружочки) и ТПМ (°С, крестики) в Среднем Баренце в 2014, 2015 и 2016 гг.

