DOI: 10.21513/2410-8758-2018-3-8-29

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БИООПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОКЕАНА, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ, В КАЧЕСТВЕ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ

О.В. Копелевич ¹⁾, А.Г. Костяной ^{1), 2)*}

¹⁾ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия, 117997, Москва, Нахимовский пр., 36; **Oleg@ocean.ru,Kostianoy@gmail.com*

²⁾ Московский университет им. С.Ю. Витте, Россия, 115432, Москва, 2-й Кожуховский пр-д, 12, строение 1

Реферат. В работе представлен краткий обзор современных возможностей дистанционного зондирования океанов и морей из космоса для мониторинга климатически значимых биооптических (биогеохимических и биологических/экосистемных) параметров океана. В данной статье обсуждаются основные климатические биооптические переменные - «цвет океана» и «фитопланктон», которые внесены в перечень из 54 основных климатических переменных, необходимых для систематических наблюдений с целью оценки климатических изменений на Земле, в рамках пронаблюдений граммы Глобальной системы за климатом (GCOS). Предлагается дополнительный список климатически значимых биооптических параметров океана, который уточняет и расширяет список этих параметров, поскольку «цвет океана» и «фитопланктон» достаточно неопределенные параметры по сравнению с другими гидрофизическими параметрами. В работе приведены примеры измерения из космоса новых биооптических параметров океана, которые предлагается внести в перечень основных климатических переменных вместо цвета океана и фитопланктона.

Ключевые слова. Климатическая система, спутниковый мониторинг, дистанционное зондирование, океаны, моря, основные климатические переменные, приборы, спутники, цвет океана, фитопланктон, концентрация хлорофилла-а, спектральный коэффициент, яркость моря, показатель диффузного ослабления, фотосинтетически активная радиация.

УДК 551.46

THE USE OF BIO-OPTICAL PARAMETERS OF THE OCEAN DERIVED FROM SATELLITE DATA AS ESSENTIAL CLIMATE VARIABLES

O.V. Kopelevich ¹⁾, A.G. Kostianoy ^{1),2)*}

P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,
Nakhimovsky Pr., 117997, Moscow, Russia; *Oleg@ocean.ru, Kostianoy@gmail.com

²⁾ S.Yu. Witte Moscow University,12, 2-nd Kozhukhovsky Pr., Build. 1, 115432, Moscow, Russia

Abstract. The paper presents a brief overview of the current capabilities of remote sensing of oceans and seas from space for monitoring climatically important bio-optical (Biogeochemical and Biological/Ecosystems) parameters of the ocean. This article discusses the <u>essential</u> climate bio-optical variables, namely, «ocean color» and «phytoplankton», which are listed among 54 Essential Climate Variables needed for systematic observations to assess climate change on the Earth, as a part of the Global Climate Observing System (GCOS) program. An additional list of climatically important bio-optical parameters of the ocean is proposed, which clarifies and expands the list of the parameters, since the "ocean color" and "phytoplankton" are rather uncertain parameters as compared to other hydrophysical parameters. The work presents examples of measurements from space of new bio-optical parameters of the ocean which are proposed to be included in the list of essential climate variables instead of the «ocean color» and «phytoplankton».

Keywords. The climate system, satellite monitoring, remote sensing, oceans, seas, essential climate variables, instruments, satellites, ocean color, phytoplankton, chlorophyll-a concentration, remote sensing reflectance, diffuse attenuation coefficient, photosynthetically available radiation.

Введение

Несколько лет назад, в рамках программы Глобальной системы наблюдений за климатом (Global Climate Observing System, GCOS) ВМО был разработан перечень из 50 основных климатических переменных (ОКП), необходимых для систематических наблюдений с целью оценки климатических изменений на Земле – в атмосфере, океане и на суше. К океану относились следующие ОКП, которые были разделены на 2 группы (Костяной, 2017 а,б):

1. <u>Поверхность океана, включая верхний перемешанный слой до глубины</u> <u>15 м</u>: температура поверхности океана (ТПО или моря – ТПМ), соленость на поверхности океана, уровень океана, состояние поверхности океана, концентрация морского льда, течения на поверхности океана, цвет океана, парциальное давление двуокиси углерода, кислотность океана, фитопланктон.

2. <u>Толща океана</u>: температура, соленость, течения, питательные вещества, парциальное давление двуокиси углерода, кислотность океана, кислород и трассеры. В работах (Костяной, 2017 а,б) эти характеристики океана были рассмотрены с точки зрения возможности их измерения и мониторинга из космоса. Было показано, что спутниковые методы могут быть использованы для мониторинга только 8 следующих параметров, входящих в первую группу ОКП: температура поверхности океана, соленость на поверхности океана, уровень океана, состояние поверхности океана (волнение), концентрация морского льда, течения на поверхности океана, цвет океана и фитопланктон. Причем некоторые из них могут быть измерены только косвенно. Кроме того, стало очевидным, что «цвет океана» и «фитопланктон» достаточно неопределенные параметры по сравнению с другими гидрофизическими параметрами, поскольку каждый из них может быть разбит на дополнительные параметры, которые требуют уточнения.

Цветовые сканеры спутникового базирования определяют спектральные свойства радиации, восходящей с водной поверхности, которая несет информацию о различных оптических характеристиках поверхностного слоя океана - прозрачности вод, концентрации взвешенного вещества, содержании хлорофилла, цветении вод и пр. Показатель поглощения желтого вещества используется как характеристика содержания окрашенной органики в морской воде. Это одна из основных характеристик качества воды в прибрежной зоне. Показатель рассеяния назад взвешенными частицами достаточно надежно рассчитывается по данным спутниковых сканеров цвета. Он характеризует содержание взвеси в воде, определяет альбедо водной толщи и является удобным параметром мониторинга. Концентрация хлорофилла – единственная характеристика морских экосистем, изменчивость которой, благодаря спутниковым наблюдениям, может быть изучена в широком диапазоне пространмасштабов. Это важнейший параметр для ственных и временных характеристики биомассы фитопланктона и расчета первичной продукции океанов и морей (Копелевич и др., 2006, 2015; Kopelevich et al., 2007, 2008; Лаврова и др., 2011, 2016).

В целом, биооптические ОКП, к которым можно отнести «цвет океана» и «фитопланктон», имеют чрезвычайно важное значение для климата Земли, поскольку они прямо или косвенно влияют на альбедо и температуру поверхности океана, тепло-массо и газообмен между атмосферой и океаном, а также на некоторые ОКП, относящиеся к поверхности океана (например, волнение, лед, парциальное давление двуокиси углерода, кислотность океана).

В 2017 г., в рамках программы Глобальной системы наблюдений за климатом была проведена инвентаризация ОКП, в результате которой перечень ОКП расширился с 50 до 54 параметров, при этом количество параметров, относящихся к океану увеличилось с 18 до 19 (GOSIC, 2018). Кроме того, эти 19 ОКП были кардинально перегруппированы таким образом, что вместо разбиения на поверхностный слой и толщу океана, теперь они разбиты на три группы – «Физические» (потоки тепла на поверхности океана, морской лед, уровень океана, волнение, соленость на поверхности океана, температура поверхности океана, подповерхностные течения, подповерхностная соленость, подповерхностная температура, поверхностные течения, напряжение трения ветра), «Биогеохимические» (неорганический углерод, оксид азота, питательные вещества – фосфаты, нитраты, силикаты, цвет океана, кислород, трассеры–хлорфторуглероды СFC-11 СFC-12, тритий и др.) и «Биологические/Экосистемы» (характеристики среды обитания – коралловые рифы, мангровые леса, заросли макрофитов, сообщества макрофитов; и планктон – фитопланктон, зоопланктон) (GOSIC, 2018).

Определения, требования и сетевая информация по всем 54 ОКП предоставляются Глобальным информационным центром систем наблюдений (Global Observing Systems Information Center) (GOSIC, 2018), который поддерживается Национальными центрами информации об окружающей среде (National Centers for Environmental Information, NCEI) Национального управления океанических и атмосферных исследований США (NOAA) и Программой ГСНК США в NCEI от имени глобального наблюдательного сообщества.

Совместная рабочая группа по климату (WGClimate) Комитета по дистанционному зондированию Земли (Committee on Earth Observation Satellites, CEOS) и Координационной группы по метеорологическим спутникам (Coordination Group for Meteorological Satellites, CGMS) предоставляет данные ОКП, измеряемые из космоса. В этой базе данных содержится следующая информация:

- 1. Цвет океана (восходящее излучение, концентрация хлорофилла-а);
- Морской лед (концентрация льда, площадь /кромка льда, толщина льда, дрейф льда);
- 3. Температура поверхности океана;
- 4. Уровень океана (региональный уровень океана, глобальный средний уровень океана);
- 5. Потоки тепла на поверхности океана (потоки скрытого и явного тепла);
- 6. Состояние океана (высота волн);
- 7. Напряжение трения ветра на поверхности океана.

Эти базы данных собраны на основе различных спутниковых сенсоров. Так, например, данные по восходящему излучению собраны за период с 1998 г. по настоящее время и распределены между приборами следующим образом: SeaWiFS – 33%, MODIS – 33%, MERIS – 24% и VIIRS – 10%. Данные по концентрации хлорофилла-а доступны за период с 1998 г. по настоящее время и распределены между приборами следующим образом: SeaWiFS – 32%, MODIS – 33%, MERIS – 24% и VIIRS – 11%.

В работах (Костяной, 2017 a, б; Kostianoy et al., 2018) подробно, с примерами уже были рассмотрены возможности дистанционного зондирования океанов и морей для мониторинга тех или иных климатически значимых параметров океана. Однако, в связи с новой классификацией ОКП, в данной работе мы кратко остановимся на возможности мониторинга всех ОКП, относящихся к океану, и более подробно – на биооптических параметрах.

Спутниковый мониторинг ОКП океана

Среди «Физических» параметров спутниковый мониторинг в результате прямых или косвенных измерений возможен для: (1) потоков тепла на поверхности океана, (2) морского льда, (3) уровня океана, (4) волнения, (4) солености на поверхности океана, (5) температуры поверхности океана, (6) поверхностных течений и (7) напряжения трения ветра. В базе спутниковых данных Совместной рабочей группы по климату (WGClimate) нет такого параметра как «соленость на поверхности океана», хотя он косвенно измеряется дистанционными методами (Костяной, 2017а). Вероятно, это связано с тем, что современная точность измерения солености со спутника – 0.3 рѕи не соответствует требованиям по точности для данного параметра в 0.01 рѕи (GOSIC, 2018).

Среди «Биогеохимических» параметров спутниковый мониторинг в результате прямых или косвенных измерений возможен только для «цвета океана», под которым понимаются два параметра – восходящее излучение (Water Leaving Radiance) и концентрация хлорофилла-а.

Среди «Биологических/Экосистемных» параметров спутниковый мониторинг в результате косвенных измерений возможен только для фитопланктона, хотя в определенных случаях некоторые характеристики коралловых рифов и мангровых лесов получить можно. Например, в настоящее время существует 227 виртуальных станций, которые по спутниковым данным отслеживают состояние коралловых рифов в Мировом океане (Coral Reef Watch, 2018). Более 20 лет спутниковые данные используются для мониторинга мангровых лесов (Rhyma Purnamasayangsukasih et al., 2016). В базе спутниковых данных Совместной рабочей группы по климату (WGClimate) нет такого параметра как «фитопланктон», хотя он косвенно измеряется дистанционными методами (Костяной, 2017б). Вероятно, это связано с тем, что требования для данного параметра еще не определены (GOSIC, 2018).

Использование данных спутниковых сканеров цвета для определения ОКП

Исследование различных оптических характеристик морских вод, ареалов распространения взвешенного вещества, определение зон интенсивного цветения фитопланктона проводится многоканальными спектрорадиометрами, такими как – CZCS, MODISAqua/Terra, MERIS Envisat, MSSu TM Landsat-5, ETM+Landsat-7, OLILandsat-8, MSI Sentinel-2, гиперспектральными сенсорами Нурегіоп, НІСО и другими (Лаврова и др., 2011, 2016).

Возможности современных сканеров цвета

В настоящее время на орбитах работают 6 сканеров цвета, удовлетворяющих основным требованиям, предъявляемым к данным для определения ОКП: глобальное покрытие Мирового океана; свободный доступ к данным; документированная оценка погрешностей (Essential Climate Variables, 2018).

Характеристики этих сканеров представлены в табл. 1 (сокращенная таблица из IOCCG, 2018); все они имеют полярные орбиты, но в таблицу также включен первый геостационарный прибор GOCI, который, хотя не имеет глобального покрытия, но охватывает акваторию площадью более 6 млн. кв. км и выполняет измерения каждый час в светлое время суток. В список имеющихся массивов данных спутниковых сканеров цвета надо также добавить уже упомянутые выше сканеры SeaWiFS и MERIS. На сайте IOCCG (International Ocean Color Coordinating Group) можно найти всю необходимую информацию о вышеуказанных спутниках.

Датчик	Агентство, страна	Спутник	Дата запус- ка	Ши- рина поло- сы. км	Прост- ранст- венное разре- шение	Число спектр. каналов	Спектр. диапа- зон, нм	Время пересе- чения экватоа
MODIS-	NASA	Aqua (EOS- PM1	04.05 2002	2330	250/500 / 1000	36	405-14385	13:30
MODIS-	NASA	Terra (EOS- AM1)	18.12 1999	2330	250/500 / 1000	36	405-14385	10:30
OLCI	ESA/ EUMET-SAT	Sentinel 3A	16.02 2016	1270	300/1200	21	400-1020	10:00
OLCI	ESA/ EUMET-SAT	Sentinel 3B	25.04 2018	1270	300/1200	21	400-1020	10:00
VIIRS	NOAA	SuomiNPP	28.10 2011	3000	375/750	22	402-11800	13:30
VIIRS	NOAA/ NASA	JPSS-1/ NOAA-20	18.11 2017	3000	375/750	22	402-11800	13:30
GOCI	KARI/KIOST	COMS	26.06 2010	2500	500	8	400-865	Геостац.

Таблица 1. Современные спутниковые датчики, подходящие для определения ОКП (IOCCG, 2018)

В ближайшем будущем планируется появление новых спутниковых датчиков цвета океана (CEOS, 2018): прежде всего, это запуск каждые 5 лет (2021, 2026 и 2031) спутников JPSS с приборами VIIPS (Joint Polar Satellite System – спутниковая система, разработанная НАСА США для получения данных, необходимых для прогнозирования погоды и научных наблюдений за климатом); прибор OLCI планируется к запуску на спутнике Sentinel 3C в 2023 г.; прибор GOCI-II должен быть выведен на геостационарную орбиту на спутнике GeoKompsat 2B уже в марте 2019 г. В 2022 г. НАСА планирует запуск спутниковой обсерватории РАСЕ (Plankton, Aerosol, Cloud, ocean Ecosystem) с прибором OCI (Ocean Color Instrument).

Популярность спутниковых датчиков цвета связана, прежде всего, с тем, что излучение видимой области спектра – единственный вид излучения, способного с малыми потерями проходить (и выходить обратно) через поверхность моря; соответственно, только датчики цвета могут обеспечить информацию о характеристиках подповерхностного слоя океана и процессах, происходящих в этом слое. «Пассивные» спутниковые датчики цвета, использующие солнечное излучение, имеют преимущество перед "активной" радиолокацией, для которой необходим источник излучения на борту спутника, также с экономической точки зрения.

Характеристики поверхностного слоя океана, определяемые по данным спутниковых датчиков цвета

Набор стандартных продуктов обработки данных спутниковых датчиков цвета MODIS и VIIRS, относящихся к океану (Algorithm Descriptions, 2018), представлен в табл. 2; похожий набор предоставляет датчик OLCI (Sentinel 3 OLCI, 2018); в таблице даны соответствующие примечания.

Толщина поверхностного слоя, доступного для оценок по спутниковым данным характеристик, приведенных в табл. 2, зависит от оптических свойств воды. В работе Gordon, McCluney (1975) предлагается считать нижней границей такого слоя глубину z_{90} , на которой величина восходящего потока солнечного излучения (для данной длины волны) составляет 90% от такого потока непосредственно под поверхностью, и показано, что z_{90} примерно равно (Kd)⁻¹. Глубина z_{90} («penetration depth") зависит от длины волны излучения и, по оценке Gordon, McCluney (1975), составляет в максимуме пропускания в наиболее чистых водах около 55 м. Учитывая, что для определения параметров в табл. 2 требуется, как минимум, две длины волны реальная толщина слоя, в которой можно оценивать значения этих параметров, не превышает 20м.

Параметр	Примечание
Спектральный коэффициент яркости моря [*] , ср ⁻¹ Remote Sensing Reflectance, Rrs, sr ⁻¹	Определяется для спектральных каналов 412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм – MODIS; 410, 443, 486, 551, 671 нм – VIIRS; 400, 412, 442, 490, 510, 560, 620, 665, 674, 681, 709 нм - OLCI
Концентрация хлорофилла-а, мг м ⁻³ Chlorophyll-a concentration, chlor_a , mg m ⁻³	chlor_a по данным MODIS и VIIRS рассчитывается через значения Rrs для 2-4 длин волн из диапазона 440-670 нм (Algorithm Descriptions, 2018). По данным OLCI chlor_а рассчитывается двумя способами: по двум длинам волн 442 и 560 нм и методом нейронных сетей.
Показатель диффузного ослабления для длины волны 490нм, м ⁻¹ Diffuse attenuation coefficient at 490nm, Kd_490, m ⁻¹	Рассчитывается для нисходящего потока солнечного излучения для слоя 0-z1, где z1 – «первая оптическая глубина», равная ~1/Kd_490. Для MODIS рассчитывается через значения Rrs для 488 и 547 нм, VIIRS – 490 и 550 нм, OLCI – 490 и 560 нм.
Первичные оптические характеристики, м ⁻¹ Inherent Optical Properties, IOPs, m ⁻¹	Для расчета IOPs по данным MODIS и VIIRS разработано программное обеспечение GIOP (Generalized IOP) (Algorithm Descriptions, 2018; Werdell et al., 2013, 2018), позволяющее рассчитывать спектральные показатели поглощения и рассеяния назад, а также значения

Таблица 2. Стандартные продукты обработки данных спутниковых датчиков цвета, относящиеся к океану (верхняя строчка – русское название, нижняя – английское)

	этих показателей для окрашенного орга- нического вещества, фитопланктона и взвешенных частиц для длины волны 443 нм. По-видимому, GIOP применимо и для OLCI.
Взвешенный органический углерод, мг м ⁻³ Particulate Organic Carbon, POC , mg m ⁻³	РОС рассчитывается через отношение значении Rrs для длин волн 443 и 547-560 нм с помощью уравнения регрессии, выведенного по данным измерений in situ для Атлантического и Тихого океанов. По-видимому, применимо и для OLCI.
Взвешенный неорганический углерод, моль м ⁻³ Particulate Inorganic Carbon, PIC , mol m ⁻³	Расчетный алгоритм включает два варианта: через отношение значений Rrs для длин волн 443 и 555 нм и с использованием трех длин волн 670, 750 и 870 нм (применяется, если 2-х волновый алгоритм не срабатывает). Пригоден для всех современных спутниковых датчиков (Algorithm Descriptions, 2018).
Фотосинтетически Активная Радиация, ФАР, Эйнштейн m^{-2} сут ⁻¹ Photosynthetically Available Radiation, PAR, Einstein $m^{-2} d^{-1}$	Количество квантов солнечного излучения (фотонов) в спектральном диапазоне 400-700 нм, падающего за сутки на 1 м^2 морской поверхности, в молях (1 Эйнштейн $\approx 6 \cdot 10^{23}$ квантов). (Algorithm Descriptions, 2018); Frouin et al., 2012).
Мгновенное значение ФАР, Эйнштейн, $M^{-2} c^{-1}$ Instantaneous PAR, iPAR, Einstein m ⁻² s ⁻¹	Интегральная облученность поверхности моря в спектральном диапазоне 400-700 нм, в Эйнштейн м ⁻² c ⁻¹ (или µЭйнштейн м ⁻² c ⁻¹). Для MODIS и OLCI (Algorithm Descriptions, 2018; Sentinel 3, 2018).
Концентрация взвешенного вещества, ΓM^{-3} Total suspended matter concentration, TSM, g m ⁻³	Входит в список стандартных продуктов OLCI вместе с оценкой ошибок расчета, рассчитывается через значения Rrs для 15 спектральных каналов (400 – 753.5 нм, 779, 865 и 1020нм) методом нейронных сетей

Предлагаемый русский перевод названия этой величины, на наш взгляд, лучше соответствует ее физическому смыслу и с точностью до множителя π тождественен термину «коэффициент яркости толщи моря» (Таблица 1.1, монография «Оптика океана», 1983). Наряду с Rrs, измеряемой <u>над</u> поверхностью океана, используется величина rrs, которая измеряется <u>под</u> поверхностью; ее принято называть «коэффициентом яркости водной толщи» (в русской литературе обычно используется величина r = $\pi \times rrs$). Величина Rrs определяется как отношение нормализованной яркости (яркость восходящего от поверхности излучения, измеренная в надир, при условии Солнца в зените и отсутствии атмосферы) к облученности, создаваемой солнечным излучением на верхней границе атмосферы; Rrs рассчитывается после атмосферной коррекции и введения соответствующих поправок (Algorithm Descriptions, 2018).

В табл. 2 отсутствует один из самых важных климатически значимых параметров – первичная биопродукция океана (Primary Productivity – PP). Это продукция, создаваемая в результате процесса фотосинтеза в поверхностном слое океана, который оказывает непосредственное влияние на баланс CO₂ в системе атмосфера-океан. Общепризнано, что единственная возможность для глобальной оценки PP – использование данных спутниковых датчиков цвета океана, однако до сих пор многолетние исследования специалистов разных стран не позволили полностью решить эту проблему. Все еще существуют заметные расхождения между спутниковыми оценками и данными измерений in situ, и между результатами расчетов по разным моделям (Lee et al., 2015). По этой причине первичная продукция до сих пор не входит в перечень стандартных продуктов обработки спутниковых данных, хотя точность разработанных алгоритмов для оценки PP заметно улучшилась; при наличии дополнительной информации о параметрах, необходимых для расчетов, результаты оказываются вполне удовлетворительными.

Параметры, определяемые по данным спутниковых сканеров цвета, рекомендуемые для включения в перечень ОКП

В опубликованном перечне ОКП – Global Observing System for Climate (GCOS) Essential Climate Variable (ECV) (GOSIC, 2018) в списке переменных, относящихся к океану, параметры, определяемые по данным спутниковых сканеров цвета (табл. 2), представлены только в группе «Биогеохимические», в группах «Физические» и «Биология/Экосисистемы» они отсутствуют. В группе «Биогеохимические» указанные параметры представлены обобщенно как «Цвет океана» (Ocean Color) с последующей расшифровкой, что имеются в виду две переменные: яркость восходящего от поверхности излучения (Water Leaving Radiance) и концентрация хлорофилла a (Chlorophyll-a Concentration). На наш взгляд, в перечень ОКП целесообразно включить еще несколько параметров из табл. 2, причем во все три вышеуказанные группы.

Группа «Физические». В эту группу предлагается включить три переменные:

Спектральный коэффициент яркости моря (Remote Sensing Reflectance), Rrs, ср⁻¹. В табл. 2 даны соответствующие примечания к этой величине. В опубликованном перечне ECV фигурирует устаревший термин Water Leaving Radiance, который использовался для сканера цвета Sea WiFS (стандартный продукт normalized water-leavin gradiance, $nLw(\lambda)$). Сейчас для всех сканеров цвета, в том числе для архивных данных Sea WiFS, используются величины Rrs(λ). Между величинами Rrs(λ) и nLw(λ) совсем простая связь: Rrs(λ) = $nLw(\lambda)/F_0(\lambda)$, где $F_0(\lambda)$ – спектральная облученность, создаваемая солнечным излучением на верхней границе атмосферы. Нормализованная яркость $nLw(\lambda)$, также как и Rrs(λ), предложена с целью минимизировать влияние геометрии наблюдений и атмосферы – она соответствует измерениям в надир при условии Солнца в зените и отсутствии атмосферы. В реальной ситуации яркость излучения $L_{w}(\lambda)$, вышедшего из-под поверхности, выражается через nLw(λ) формулой: $L_w(\lambda) = t_0(\lambda) \cdot L_{WN}(\lambda) \cdot \cos q_0$, где $t_0(\lambda) -$ спектральное пропускание атмосферой нисходящего солнечного излучения, q_0 – зенитный угол Солнца. Как уже указывалась выше, переменная $nLw(\lambda)$ включена в группу «Биогеохимические», по-видимому, потому что эти величины используются для расчета биогеохимических характеристик, но по своей сути это, конечно, физическая характеристика, имеющая четкий физический смысл. Нам представляется целесообразным, чтобы предлагаемые ОКП образовывали комплексы параметров, позволяющие рассчитывать климатически значимые величины, в данном случае речь пойдет о количественных оценках поступления на поверхность моря и проникновения в водную толщу фотосинтетически активной радиации (ФАР).

В группу ОКП «**Поверхность**» (**Surface**) включена обобщенная переменная «Радиационный Баланс на поверхности» (Surface Radiation Budget), которая включает длинноволновую и коротковолновую радиацию (Surface ERB long wave and short wave). Термин «коротковолновая радиация» относится к солнечному излучению спектрального диапазона 0.3-5мкм, который охватывает большую часть лучистой энергии, излучаемой Солнцем. ФАР относится к спектральному диапазону 400-700 нм, эта часть спектра представляет особый интерес с точки зрения своей климатической значимости.

Во-первых, излучение этого диапазона используется в процессе фотосинтеза для создания первичной продукции, одного из факторов, существенно влияющих на баланс СО2 в системе атмосфера-океан. Фотосинтетическое связывание углерода морским фитопланктоном с последующим его переносом на дно препятствует возрастанию содержания СО2 в атмосфере (так называемый «биологический насос»). Во-вторых, видимое излучение, в отличие от ультрафиолетового и инфракрасного, способно проникать в водную толщу на достаточно большие глубины и, в результате объемного поглощения в водной среде, оказывать заметное влияние на формирование термической структуры и теплосодержания поверхностного слоя (Федоров, Гинзбург, 1988). Для сравнения укажем, что глубина «фотического» (освещенного) слоя, которая принимается равной глубине 1%-ной облученности от поверхностной, равна 4.6/Kd, тогда как «penetration depth» z_{00} (см. выше) равна лишь 1/Kd. Проведенные ранее расчеты показали, что изменение оптических свойств воды и, соответственно, изменение объемного поглощения влияет на температуру воды (Копелевич и др., 2003; Frouin, Iacobellis, 2002).

Чтобы получить полный комплекс параметров, позволяющих оценивать баланс ФАР на поверхности моря и ее уровни на различных горизонтах в водной толще, предлагается включить в группу «Физические» еще два параметра из табл. 2: показатель диффузного ослабления (diffuse attenuation coefficient) Kd (490), м⁻¹ и фотосинтетически активную радиацию (photosynthetically available radiation), Эйнштейн м⁻² сут⁻¹. Совокупность этих трех переменных даст возможность приближенно оценивать не только ФАР, поступающую на поверхность, но и ФАР, вышедшую из-под поверхности и отраженную от поверхности (для последней еще потребуются данные о скорости ветра), также поглощенную в водной толще.

Подобные величины рассматриваются в группе ОКП «Суша» (Land), в которую включены переменные «Альбедо» (Albedo) и «Доля поглощенной фотосинтетически активной радиации» (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation); пояснение к ним даны на сайте GOSIC (2018). На наш взгляд целесообразно иметь подобные величины и для океана как отношение потока ФАР, восходящего от поверхности океана (включающего как отраженное от поверхности излучение, так и вышедшее из-под

поверхности), к потоку ФАР, падающему на поверхность, соответственно отношение поглощенной ФАР к этому потоку. Сопоставление этих величин для океана и для суши, также как с оценками для коротковолновой радиации из группы «Поверхность» (см. выше), позволит получить интересную информацию об особенностях климатической изменчивости для суши и океана и роли ФАР в этой изменчивости.

Расчеты вышеуказанных составляющих баланса ФАР проводились ранее для Баренцева моря по данным сканера цвета SeaWiFS: среднемесячных величин падающей, отраженной и вышедшей из водной толщи ФАР на уровне поверхности моря (Копелевич и др., 2003), также подводной облученности и ФАР, поглощенной в водной толще (Кореlevich et al., 2007). Валидация по данным судовых измерений дневных экспозиций ФАР на поверхности моря, рассчитанных по спутниковым данным, показала, что расчеты этой величины дают приемлемую точность на пространственных масштабах порядка 100 км (Vazyulya et al., 2016). Результаты таких расчетов демонстрируются далее.

Группа «Биогеохимические». На наш взгляд, переменную «концентрация хлорофилла-а» (Chlorophyll–a Concentration) следует перенести из этой группы в группу «Биология/Экосистемы». Хлорофилл – пигмент, который содержится в клетках фитопланктона; его используют для оценки биомассы фитопланктона, это ключевая характеристика для расчета первичной продукции, создаваемой фитопланктоном.

В группу «Биогеохимические» целесообразно включить такие биогеохимические параметры как «концентрация взвешенного вещества» (Total Suspended Matter), г м⁻³ и показатель поглощения окрашенного органического вещества, м⁻¹ (см. табл. 2, «Первичные оптические характеристики»). Оба параметра – полезные индикаторы изменений поступления в океан взвешенного и растворенного вещества, связанных в частности, с климатическими изменениями. В первую очередь, это относится к поступлению благодаря речному стоку, и включение этих параметров в группу «Биогеохимические» для океана даст возможность сопоставлять их изменения с переменной «Речной сток» (River Discharge) в группе «Суша».

Группа «Биология/Экосистемы». Мы предлагаем включить в подгруппу «Фитопланктон» (Phytoplankton) (GOSIC, 2018) две переменных: «концентрация хлорофилла-а» (Chlorophyll–a Concentration), мг м⁻³, о которой уже шла речь выше, и «взвешенный неорганический углерод» (Particulate Inorganic Carbon - PIC), моль м⁻³ из табл. 2. Вторая из них используется для количественной оценки интенсивности кокколитофоридных цветений (Gordon et al., 2001).

Кокколитофориды – одноклеточные водоросли, представляющие собой сферические клетки, окруженные дискообразными чешуйками (кокколитами), состоящими из карбоната кальция CaCO₃. Кокколитофоридные цветения (КЦ) могут охватывать громадные площади в различных океанах и многих морях и оказывать существенное влияние на важные физические и биогеохимические процессы, в частности на обмен CO₂ между океаном и атмосферой, и глобальные климатические изменения. Они обеспечивают

функционирование другого вида биологического насоса – карбонатного, который связан с образованием неорганических форм, таких как кальциты, арагониты и т.д. Кокколитофориды и кокколиты отличаются сильным светорассеянием и поэтому оказывают заметное влияние на проникновение ФАР в водную толщу, увеличивая ее альбедо (Копелевич и др., 2003).

Для Черного и Баренцева морей разработаны региональные алгоритмы для оценки по спутниковым данным концентрации клеток кокколитофорид Ncoc. Между среднемесячными значениями PIC, моль м⁻³ и Ncoc, млн.кл./л обнаружена значимая корреляционная связь: значению Ncoc, равному 1 млн.кл./л, примерно соответствует значение PIC 0.004 моль м⁻³ для северо-восточной части Черного моря (Kopelevich et al., 2014) и 0.003 моль м⁻³ для Баренцева (Копелевич и др., 20176).

Необходимость использования региональных алгоритмов для акваторий с аллохтонными источниками оптически активных примесей

Алгоритмы для расчета стандартных продуктов обработки данных спутниковых датчиков цвета разработаны большей частью на основе данных измерений для океанских вод, оптические свойства которых определяются главным образом автохтонными компонентами содержащегося в морской воде вещества. Для акваторий, где существенно поступление оптически активных примесей от аллохтонных источников, стандартные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла, взвеси и окрашенного органического вещества могут давать большие ошибки. В первую очередь, это относится ко многим морям России, которые находятся под сильным влиянием речного стока. Для морей России имеющиеся данные показывают существенное завышение значений концентрации хлорофилла, рассчитанных по спутниковым данным, по сравнению с измеренными значениями. Для Баренцева и северной половины Каспийского моря завышение достигало 20 раз, для Черного моря – примерно вдвое (Копелевич и др., 2006). Для этих и подобных регионов требуются региональные алгоритмы, учитывающие специфические особенности рассматриваемого бассейна. Такие алгоритмы могут быть разработаны только на основе данных натурных измерений в исследуемом регионе.

На рис. 1 показано сравнение значений концентрации хлорофилла по данным прямых определений и расчетов по данным спутникового сканера MODIS-Aqua посредством стандартного алгоритма и разработанного регионального алгоритма (Кузнецова и др., 2013). Карское море принимает крупнейший в Арктическом бассейне пресноводный речной сток, из которого около 90% приходятся на Обь и Енисей. Влияние этого стока распространяется практически на все море, и эта особенность имеет важное значение для разработки алгоритма определения концентрации хлорофилла по данным спутниковых сканеров цвета, поскольку речной сток непосредственно влияет на оптические свойства морской воды и формирование спектральных величин светового излучения, выходящего из водной толщи.



Рисунок 1. Маршрут 59-го рейса НИС «Академик Мстислав Келдыш» в Карском море в сентябре 2011г. (А) и изменения концентрации хлорофилла по маршруту (Б) (ст.5013-5015 в водах Енисея исключены)

Точечная линия – данные прямых определений; сплошная – расчет по спутниковым данным посредством разработанного регионального алгоритма; пунктир – посредством стандартного алгоритма MODIS (Кузнецова и др., 2013)

Из рисунка видно, что региональный алгоритм обеспечивает достаточно хорошее согласие рассчитанных значений с измеренными, тогда как стандартный алгоритм MODIS на большей части маршрута значительно завышает рассчитанные значения концентрации. Средние по маршруту значения концентрации хлорофилла оказались равны 1.13, 0.90 и 3.23 мг м⁻³, соответственно, по данным прямых определений, расчетов по региональному и стандартному алгоритмам, т.е. завышение примерно в 3 раза, тогда как регионального алгоритма меньше 8%.

В ИО РАН региональные алгоритмы были разработаны по данным экспедиционных исследований, как для концентрации хлорофилла, так и других биооптических параметров для Баренцевого, Белого, Черного и Каспийского морей, Финского залива в Балтийском море (Копелевич и др., 2006, 2015, Vazyulya et al., 2014 и др.).

Примеры расчетов баланса солнечной радиации по спутниковым данным

В этом разделе на примере Баренцева моря демонстрируются возможности оценок по спутниковым данным составляющих баланса ФАР на поверхности моря и в подповерхностном слое.

ФАР на поверхности моря. На рис. 2 показаны среднемесячные распределения дневной экспозиции ФАР на верхней границе атмосферы и на поверхности моря, в сравнении с распределением среднемесячных значений оптической толщины облаков (Копелевич и др., 2003).



Рисунок 2. Среднемесячные распределения дневной экспозиции ФАР, МДж м⁻² сут⁻¹ на верхней границе атмосферы (а) и на поверхности моря (б); оптическая толщина облаков (в) *Баренцево море, август 2000г. Рассчитаны по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS*

Видно, что распределения значений ФАР на верхней границе атмосферы и на поверхности моря резко различны: если первое зонально, то второе, по крайней мере, в открытой части Баренцева моря скорее меридионально и хорошо соответствует распределению оптической толщины облаков. Значения последней величины для большей части Баренцева моря превышают 10; а над Белым морем они в основном меньше 5; соответственно, среднемесячные значения пропускания ФАР атмосферой составляют меньше 50% над западной и центральной частью Баренцева моря и более 60% над Белым морем. Последнее получает наибольшую величину ФАР – более 7 МДж м⁻² день⁻¹ и по той причине, что оно расположено южнее, и потому что над ним меньше облаков. Среднемесячные значения дневной экспозиции ФАР на поверхности в западной и центральной частях Баренцева моря составляют меньше 5 МДж м⁻² день⁻¹.

Альбедо поверхности моря. Значения альбедо поверхности моря (отношение потока ФАР, отраженного от поверхности, к потоку, падающему на

О.В. Копелевич, А.Г. Костяной

поверхность) определяются условиями освещения поверхности (углами падения прямого и рассеянного солнечного излучения на поверхность моря) и состоянием поверхности (распределением уклонов и наличием пены), которое зависит от скорости ветра. Условия освещения определяются астрономическим фактором (углами падения солнечного излучения на верхнюю границу атмосферы, изменяющимися в течение дня и в зависимости от времени года) и рассеянием света в атмосфере, особенно сильным при наличии облачности. Чтобы оценить действие этих факторов, был выполнен модельный эксперимент, в котором значения альбедо поверхности были рассчитаны не только для реальных условий наблюдения, но и при отсутствии ветра и облаков.



Рисунок 3. Среднемесячные распределения реального альбедо поверхности моря, % (a), рассчитанного по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS; то же при отсутствии ветра (б) и отсутствии облачности (в) Баренцево море, август 2000 г. (Копелевич и др., 2003)

Как видно из рис. 3, при отсутствии ветра относительное распределение значений альбедо в основном сохраняется, но его абсолютные значения увеличиваются; при отсутствии облачности распределение значений альбедо становится почти зональным, и его абсолютные значения резко возрастают. Наблюдаемый эффект связан со спецификой полярных широт, а именно с низкими высотами Солнца. Расчеты показывают, что для августа среднемесячные значения косинуса зенитного угла Солнца (средние за светлое время суток значения, усредненные за месяц) составляют 0.2-0.25 в северной части Баренцева моря, 0.25-0.35 – в средней, 0.35-0.4 – в южной и для Белого моря. Эти значения косинуса соответствуют углам падения солнечных лучей на гладкую поверхность от 78.5° до 66.4° соответственно. Ясно, что при таких больших углах появление негоризонтальных площадок в результате волнения приводит к уменьшению углов падения излучения на такие площадки и, соответственно, уменьшению значений коэффициента отражения. Действительно, значения альбедо гладкой поверхности выше их значений для реальных условий, но эффект не очень значителен: разница составляет, как видно из сравнения рис. За и Зб, лишь 0.5-1%.

Гораздо сильнее проявляется влияние облачности: из сравнения рис. За и Зв видно, что при отсутствии облаков значения альбедо поверхности существенно выше, чем при реальных условиях; их значения возрастают с юга на север от <7.5% для Белого моря до >12% для северной части Баренцева. Прирост, по сравнению с реальными условиями, составляет 1.5-7.5% и даже более. Причина заключается в том, что излучение, прошедшее через облачный слой, падает на поверхность моря в среднем под меньшими углами, чем прямые солнечные лучи, и соответственно меньше отражается.

Альбедо водной толщи. Распределение среднемесячных значений альбедо водной толщи (отношение потока ФАР, вышедшего из-под поверхности, к потоку, падающему на поверхность) представлено на рис. 4a, где выделяется область его повышенных значений в районе $70-73^{\circ}$ с.ш., $35-45^{\circ}$ в.д. Причина их возникновения становится понятной из сопоставления рис. 4a и 4б – видно, что указанная область соответствует области повышенных значений показателя рассеяния назад взвешенных частиц, связанной с кокколитофоридным цветением.



Рисунок 4. Среднемесячные распределения альбедо водной толщи (а) и показателя рассеяния назад взвешенными частицами bbp, м⁻¹ (б),

рассчитанные по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS Баренцево море, август 2000 г. (Копелевич и др., 2003)

Кокколитофоридное цветение представляет собой тот редкий случай, когда изменяется в основном показатель рассеяния (в том числе и рассеяния назад) – он резко возрастает, тогда как показатель поглощения остается практически постоянным (в отличие, например, от речного стока, когда возрастает и рассеяние и поглощение, поскольку река выносит в море как взвесь, так и окрашенное органическое вещество). Поэтому в случае кокколитофоридного цветения альбедо водной толщи особенно велико – в районе наиболее высоких значений показателя рассеяния назад взвеси (более 0.02 м⁻¹ на рис. 4а) значения альбедо водной толщи могут превышать 4%. Вне области предполагаемого кокколитофоридного цветения значения альбедо водной толщи в основном меньше 1%. Разница более 3% весьма существенна с точки зрения баланса солнечного излучения – это означает, что кокколитофоридное цветение более чем на 3% уменьшает количество ФАР, поглощенной в водной толще.

Объемное поглощение ФАР в водной толще. На рис. 5 показаны среднемесячные распределения доли поглощенной ФАР (отношение поглощенной ФАР к потоку ФАР на поверхности) в слоях 2-3 м и 15-25 м. Как видно, эти распределения пространственно неоднородны и для выбранных слов существенно различны. Поглощенная внутри водной толщи солнечная радиация влияет на тепловой баланс океана (Kopelevich et al., 2007).



Рисунок 5. Среднемесячные распределения доли поглощенной ФАР в слое 2-3 м (а) и в слое 15-25 м (б), рассчитанные по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS Баренцево море, август 2000 г. (Kopelevich et al., 2007).

Сделанные оценки потенциального дневного прогрева (в предположении, что вся поглощенная радиация превращается в тепло), показали различия этих величин в разных районах. Естественно, что выше всего дневной прогрев в Белом море, где больше солнечная инсоляция. Потенциальный дневной прогрев в слое 0-1 м составил здесь около 0.57°C, для слоя 10-15 м он лишь 0.01°C (Kopelevich et al., 2007).

На проникновение солнечного излучения в воды Баренцева моря значительное влияние оказывают кокколитофоридные цветения (рис. 6).

Как видно на рис. 6, при отсутствии цветения альбедо водной толщи составляет меньше 1% (на 41° в.д.), при возрастании концентрации кокколитофорид до 2.6 млн. кл/л альбедо возрастает почти до 8% (на 40° в.д.). Величина нисходящей ФАР на глубине 5 м уменьшается еще более резко от 135 Вт m^{-2} до 79 Вт m^{-2} (более чем на 40%).

Хотя температура поверхностного слоя западной половины Баренцева моря определяется, в первую очередь, поступлением теплых атлантических вод с Норвежским течением, солнечная радиация как инфракрасного, так и видимого диапазонов, также вносит существенный вклад. По данным спутни-ковых наблюдений обнаружена связь между изменением среднемесячных значений температуры поверхности моря (ТПМ) и ФАР, усредненных по площади средней части Баренцева моря в мае-сентябре 2014, 2015 и 2016 гг. (Копелевич и др., 2017а). Если в 2014 г. значения ТПМ примерно соответствовали "среднеклиматическим" (2003–2011 гг.), то в 2015 и 2016 гг. они во все месяцы были заметно выше. Наибольшее количество солнечной радиации видимого диапазона за весь летний сезон (июнь-август) поступило в поверхностный слой 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.



Рисунок 6. Изменение величины ФАР на глубине 5 м (Вт м⁻², кружочки, сплошная линия), концентрации кокколитофорид Ncoc (млн. кл/л, ромбики, сплошная линия) и альбедо водной толщи (%, крестики, пунктирная линия) на разрезе по 71° с.ш. в Баренцевом море по данным сканера MODIS 6.07.2016 г. (Копелевич и др., 2017а)

Заключение

В 2017 г., в рамках программы Глобальной системы наблюдений за климатом была проведена инвентаризация ОКП, в результате которой перечень ОКП расширился с 50 до 54 параметров, при этом количество параметров, относящихся к океану увеличилось с 18 до 19 (GOSIC, 2018). Кроме того, эти 19 ОКП были кардинально перегруппированы таким образом, что вместо разбиения на поверхностный слой и толщу океана, теперь они разбиты на три группы – «Физические», «Биогеохимические» и «Биологические/Экосистемы» (GOSIC, 2018). В опубликованном перечне ОКП – Global Observing System for Climate (GCOS) Essential Climate Variable (ECV) (GOSIC, 2018) B списке переменных, относящихся к океану, параметры, определяемые по данным спутниковых сканеров цвета, представлены только в группе «Биогеохимические», в группах «Физические» и «Биология/Экосисистемы» они отсутствуют. В группе «Биогеохимические» указанные параметры представлены обобщенно как «Цвет океана» (Ocean Color) с последующей расшифровкой, что имеются в виду две переменные: яркость восходящего от поверхности излучения (Water Leaving Radiance) и концентрация хлорофилла a (Chlorophyll-a Concentration). На наш взгляд, в перечень ОКП целесообразно включить следующие параметры, причем во все три вышеуказанные группы.

В группу «Физические» предлагается включить три переменные:

Спектральный коэффициент яркости моря (Remote Sensing Reflectance), Показатель диффузного ослабления (diffuse attenuation coefficient),

Фотосинтетически активная радиация (photosyntheticallya vailable radiation).

Совокупность этих трех переменных даст возможность приближенно оценивать не только ФАР, поступающую на поверхность, но и ФАР, вышедшую из-под поверхности и отраженную от поверхности (для последней еще потребуются данные о скорости ветра), а также поглощенную в водной толще.

Подобные величины рассматриваются в группе ОКП «Суша» (Land), в которую включены переменные «Альбедо» (Albedo) и «Доля поглощенной фотосинтетическиактивной радиации» (Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation). На наш взгляд целесообразно иметь подобные величины и для океана как отношение потока ФАР, восходящего от поверхности океана (включающего как отраженное от поверхности излучение, так и вышедшее из-под поверхности), к потоку ФАР, падающему на поверхность, соответственно отношение поглощенной ФАР к этому потоку. Сопоставление этих величин для океана и для суши, также как с оценками для коротковолновой радиации из группы «Поверхность», позволит получить интересную информацию об особенностях климатической изменчивости для суши и океана и роли ФАР в этой изменчивости.

На наш взгляд, переменную «концентрация хлорофилла-а» (Chlorophyll–a Concentration) следует перенести из группы «Биогеохимические» в группу «Биология/Экосистемы». Хлорофилл – пигмент, который содержится в клетках фитопланктона; его используют для оценки биомассы фитопланктона, это ключевая характеристика для расчета первичной продукции, создаваемой фитопланктоном.

В группу «Биогеохимические» целесообразно включить такие биогеохимические параметры как «концентрация взвешенного вещества» (Total Suspended Matter) и «показатель поглощения окрашенного органического вещества» (The absorption coefficient of colored dissolved organic matter). Оба параметра – полезные индикаторы изменений поступления в океан взвешенного и растворенного вещества, связанных в частности, с климатическими изменениями. В первую очередь, это относится к поступлению благодаря речному стоку, и включение этих параметров в группу «Биогеохимические» для океана даст возможность сопоставлять их изменения с переменной «Речной сток» (River Discharge) в группе ОКП «Суша».

Мы предлагаем включить в подгруппу «Фитопланктон» (Phytoplankton), входящую в группу «Биология/Экосистемы», две переменные: «концентрация хлорофилла-а» (Chlorophyll–a Concentration) и «взвешенный неорганический углерод» (Particulate Inorganic Carbon). Вторая из них используется для количественной оценки интенсивности кокколитофоридных цветений, которые могут охватывать громадные площади в различных океанах и морях и оказывать существенное влияние на важные физические и биогеохимические процессы, в частности на обмен CO₂ между океаном и атмосферой, и глобальные климатические изменения. Кроме того, кокколитофориды и кокколиты отличаются сильным светорассеянием и поэтому оказывают заметное влияние на проникновение ФАР в водную толщу, увеличивая ее альбедо.

Все перечисленные выше параметры, предлагаемые для включения в список ОКП, относящихся к океану, хорошо определяются по данным спутниковых датчиков цвета.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-50-00095).

Список литературы

Копелевич О.В., Буренков В.И., С.В. Вазюля и др. 2003. Оценка баланса ФАР в Баренцевом море по данным спутникового сканера цвета SeaWiFS. – Океанология, т. 43, № 6, с. 834-845.

Копелевич О.В., Буренков В.И., Шеберстов С.В. 2006. Разработка и использование региональных алгоритмов для расчета биооптических характеристик морей России по данным спутниковых сканеров цвета. – Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса, т. 3, № 2, с. 99-105.

Копелевич О.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И. 2015. Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2014 гг.». – Соврем. проблемы дистанц. зондирования Земли из космоса, т. 12, № 6, с. 99–110.

Копелевич О.В., Вазюля С.В., Григорьев А.В., Храпко А.Н., Шеберстов С.В., Салинг И.В. 2017а. Проникновение солнечной радиации видимого диапазона в воды Баренцева моря в зависимости от облачности и кокколитофоридных цветений. – Океанология, т. 57, №3, с. 445-453.

Копелевич О.В., Каралли П.Г., Лохов А.С., Салинг И.В., Шеберстов С.В. 2017б. Перспективы улучшения точности оценки параметров кокколитофоридных цветений в Баренцевом море по спутниковым данным. – Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 14, № 7, с. 267–279.

Костяной А.Г. 2017а. Спутниковый мониторинг климатических параметров океана. Часть 1. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 2, с.27-49.

Костяной А.Г., 2017б. Спутниковый мониторинг климатических параметров океана. Часть 2. – Фундаментальная и прикладная климатология, № 3, с.57-83.

Кузнецова О.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Демидов А.Б., Мошаров С.А. 2013. Оценка концентрации хлорофилла в Карском море по данным спутникового сканера MODIS-Aqua. – Исследование Земли из космоса, № 5, с. 21-31.

Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. 2011. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. – М., ИКИ РАН, 470 с.

Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. 2016. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. – М., ИКИ РАН, 334 с.

Оптика океана (под редакцией А.С. Монина). 1983. Т. 1. Физическая оптика океана.

Федоров К.Н., Гинзбург А.И. 1988. Приповерхностный слой океана. – Ленинград, Гидрометеоиздат, 303 с.

Algorithm Descriptions. 2018. https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd (просмотрено 17.06.2018).

CEOS. 2018. http://database.eohandbook.com. The CEOS database: mission, instruments and measurements (просмотрено 17.06.2018).

Coral Reef Watch. 2018. https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.php (просмотрено 11 февраля 2018 г.)

Essential Climate Variables. 2018. https://public.wmo.int/en/programmes/globalclimate-observing-system/essential-climate-variables (просмотрено 17.06.2018 г.).

Frouin R., Iacobellis S. F. 2002. Influence of phytoplankton on the global radiation budget. – J. Geophys. Res., vol. 107, No D19, pp. 5-1 - 5-10.

Frouin R. R., J. McPherson, Ueyoshi K, and Franz B.A. 2012. A time series of photosynthetically available radiation at the ocean surface from SeaWiFS and MODIS data. – Proc. SPIE, vol. 8525. 852519 (December 11, 2012); doi:10.1117/12.9812642012).

Gordon H., McCluney W. 1975. Estimation of the Depth of Sunlight Penetration in the Sea for Remote Sensing. – Applied Optics, vol. 14, No. 2, pp. 413-416. DOI: 10.1364/AO.14.000413.

Gordon, H. R., Boynton, G. C., Balch, W. M., et al. 2001. Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS imagery. – Geophysical Research Letters, vol. 28, No. 8, pp. 1587-1590.

GOSIC. 2018. https://www.ncdc.noaa.gov/gosic/gcos-essential-climatevariableecv-data-access-matrix (просмотрено 10 февраля 2018 г.)

IOCCG. 2018. http://ioccg.org/resources/missions-instruments/current-ocean-colour-sensors (просмотрено 17 июня 2018 г.).

Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Vazyulya S.V., Likhacheva M.V. 2007. Assessment of underwater irradiance and absorption of solar radiation at water column from satellite data. – Proc. SPIE. 6615, 661507.

Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov, S.V. 2008. Case studies of optical remote sensing in the Barents Sea, Black Sea and Caspian Sea. – In: Barale V., Gade M. (eds.) Remote Sensing of the European Seas, Springer, pp. 53-66.

Kopelevich O., Burenkov V., Sheberstov S., Vazyulya S., Kravchishina M., Pautova L., Silkin V., Artemiev V., Grigoriev A. 2014. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from ocean color data. – Remote Sensing of Environment, vol, 25 April 2014, pp. 113–123.

Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Kopelevich O.V., Kudryavtsev V.N., Lavrova O.Yu., Lebedev S.A., Mitnik L.M., Mityagina M.I., Smirnov V.G., Stanichny S.V., Troitskaya Yu.I. 2018. Ocean Remote Sensing in Russia. – In S. Liang (Ed.), Comprehensive Remote Sensing, Oxford: Elsevier, vol. 8, pp. 284–325.

Lee Z., Marra J., Perry M.J., Kahru M. 2015. Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: A strategic assessment. – J. Mar. Systems, vol. 149, pp.50-59.

Rhyma Purnamasayangsukasih P., Norizah K., Ismail Adnan A.M., Shamsudin I. 2016. A review of uses of satellite imagery in monitoring mangrove forests. – IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 37, 012034, doi:10.1088/1755-1315/37/1/012034.

Sentinel 3 OLCI. 2018. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/ sentinel-3-olci/product-types /level-2-water (просмотрено 17.06.2018).

Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A. 2014. Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data. – Oceanologia, vol. 56, No 4, pp. 1-19.

Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Artemiev V.A. 2016. Estimation of sea surface solar radiation at 400-700 nm using satellite ocean color data, and its validation by ship data. – Optics Express, vol 24, No 6, pp. A604-A611. DOI: 10.1364/OE.24.00A604.

Werdell, P.J., Franz, B.A., Bailey, S.W. et al. 2013. Generalized ocean color inversion model for retrieving marine inherent optical properties. – Appl. Opt., vol. 52, pp. 2019–2037.

Werdell P. J., Lachlan I.W., McKinna et al. 2018. An overview of approaches and challenges for retrieving marine inherent optical properties from ocean color remote sensing. – Progress in Oceanography, vol. 160, pp. 186–212.

Статья поступила в редакцию: 28.07.2018 г.

После переработки: 31.07.2018 г.