

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.463.5

DOI: 10.22449/0233-7584-2018-1-29-39

## Сопоставление вторичных продуктов оптического сенсора космического аппарата «Ресурс-П» с продуктами аналогичных оптических сенсоров

**С. В. Федоров**

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*E-mail: s.fedorov@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 12.09.2017 г.

Приводятся характеристики широкозахватной мультиспектральной аппаратуры высокого разрешения (ШМСА-ВР), установленной на российских спутниках типа «Ресурс-П», рассматривается возможность использования данных этого сенсора для решения задач спутниковой гидрофизики. Сравниваются концентрация хлорофилла *a* и нормализованная спектральная яркость водной толщи, рассчитанные научным центром оперативного мониторинга Земли АО «Российские космические системы», с аналогичными продуктами зарубежных оптических сенсоров *MODIS/Aqua* и *Terra*, *OLI/Landsat-8*. Анализ показал, что значения нормализованной яркости, полученные по данным ШМСА-ВР, в красной области спектра примерно в два раза больше, а в зеленой области – на 15–20 % меньше аналогичных данных зарубежных сенсоров. В синей области спектра нормализованной яркости (по данным ШМСА-ВР) не наблюдается характерный максимум на длине волны 488 нм и уменьшение в области поглощения желтым веществом на длинах 412 и 443 нм. Концентрации хлорофилла *a* по данным всех рассматриваемых сенсоров сопоставимы друг с другом, что объясняется минимальными различиями в используемых для расчета хлорофилла *a* значениях нормализованной яркости водной толщи на длинах волн 488 и 555 нм.

**Ключевые слова:** оптические мультиспектральные сенсоры, концентрация хлорофилла *a*, нормализованная спектральная яркость водной толщи, ШМСА-ВР, Ресурс-П, *MODIS*, *OLI/Landsat-8*.

**Для цитирования:** Федоров С. В. Сопоставление вторичных продуктов оптического сенсора космического аппарата «Ресурс-П» с продуктами аналогичных оптических сенсоров // Морской гидрофизический журнал. Т. 34, № 1. С. 29–39. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-29-39

## Comparison of the secondary products obtained by the optical sensor installed at the satellite «Resurs-P» with the products of the analogous optical sensors

**S. V. Fedorov**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Science, Sevastopol, Russia*

*e-mail: s.fedorov@mhi-ras.ru*

Characteristics of the wide-swath multi-spectral equipment with high-resolution (WSME-HR) installed at the Russian satellites of the “Resurs-P” type are represented; possibility of applying the data obtained by this sensor for solving the problems of satellite hydrophysics is considered. The chlorophyll-*a* concentration and the normalized water-leaving radiance calculated by the Earth operational monitoring scientific center JSC “Russian Space Systems” are compared with the similar products of the foreign optical sensors MODIS (Aqua and Terra) and OLI (Landsat-8). Being analyzed, the normalized water-leaving radiance spectra show that the values retrieved from the WSME-HR data, are about two times higher in the spectrum red range and by 15–20 % smaller in the green range than the analogous ones resulted from the foreign sensors; whereas in the blue spectrum range they do not reproduce both their typical maximum on the wavelength 488 nm and their decrease accompanying the dissolved colored organic matter absorption on the 412 and 443 nm wavelengths. The chlorophyll-*a* concentration values derived from the data of all the sensors are comparable with each other; this fact is explained by minimum differences between the values of the normalized water-leaving radiance on the wavelengths 488 and 555 nm applied for calculating the chlorophyll-*a* concentration.

**Keywords:** optical multi-spectral sensor, chlorophyll-*a* concentration, normalized water-leaving radiance, WSME-HR, Resurs-P, MODIS, OLI.

**For citation:** Fedorov, S.V., 2018. Comparison of the secondary products obtained by the optical sensor installed at the satellite “Resurs-P” with the products of the analogous optical sensors. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(1), pp. 29–39. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-29-39 (in Russian).

© Федоров С.В., 2018

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ Т. 34, № 1 2018

29

## Введение

В настоящее время группировка российских спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) насчитывает восемь космических аппаратов, оснащенных оптическими сканерами различного пространственного и спектрального разрешения. Стратегия развития ДЗЗ в 2016–2020 гг. предусматривает увеличение количества спутников до 20, что обеспечит измерение отраженной яркости с высоким пространственным и временным разрешением. Данные оптических сканеров российских спутников используются в картографии, лесном хозяйстве, при мониторинге чрезвычайных ситуаций и в других областях, но в области океанологии и спутниковой гидрофизики они не нашли широкого применения.

Основное назначение спутников типа «Ресурс-П» – исследование природных ресурсов и мониторинг чрезвычайных ситуаций – причина существенного отличия их оптических приборов по количеству спектральных каналов и их ширине от специализированных сканеров цвета океана. Однако для определения биооптических параметров прибрежных вод, эстуариев, озер и рек, когда требуется высокое пространственное разрешение, недоступное для современных сканеров цвета океана, успешно применяются оптические сканеры, предназначенные для мониторинга суши, например сканеры *ETM+* и *OLI* на спутниках *Landsat-7* и *Landsat-8* [1–5], сканеры *WVC* и *CZI* на китайских миниспутниках *HJ-1* и *HY-1* [6, 7]. Подобный положительный опыт позволяет предполагать, что и данные мультиспектральных сканеров Ресурс-П могут быть успешно использованы для решения такого рода задач.

Оператором российских космических систем ДЗЗ является Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы», который планирует съемки и предоставляет информацию заказчикам. Кроме данных стандартных уровней обработки, НЦ ОМЗ предоставляет ряд вторичных продуктов для различных областей применения (сельское хозяйство, природопользование, экология и т. д.). Эти продукты могут быть заказаны через банк базовых продуктов (ББП) (URL: <http://bbp.ntsomz.ru>) [8, 9]. Их набор различается в зависимости от назначения и спектрального диапазона измерений оптических сенсоров.

Наибольший интерес для задач океанологии и спутниковой гидрофизики представляют следующие вторичные продукты, характеризующие оптические свойства вод: нормализованная спектральная яркость водной толщи  $nL_w(\lambda)$ ; концентрация хлорофилла  $a C_a$ ; концентрация растворенного органического углерода *DOC*; концентрация общего взвешенного вещества *TSM*; фотосинтетически активная радиация *PAR*; коэффициент диффузного ослабления света; глубина видимости белого диска и др. Этот набор вторичных продуктов с пространственным разрешением  $100 \times 100$  м получен НЦ ОМЗ по данным измерений широкозахватной мультиспектральной съемочной аппаратуры высокого разрешения (ШМСА-ВР) на космических аппаратах (КА) типа «Ресурс-П» [10].

В данной работе анализируются два вторичных продукта: нормализованная спектральная яркость водной толщи  $nL_w(\lambda)$ , через которую обычно рассчитываются другие спутниковые продукты, и концентрация хлорофилла  $a C_a$ , представляющая важный показатель биопродуктивности. Анализ

осуществляется путем сравнения вторичных продуктов  $C_a$  и  $nL_w(\lambda)$ , полученных по данным измерений ШМСА-ВР, с аналогичными продуктами зарубежных оптических сенсоров (*MODIS/Aqua*, *MODIS/Terra* и *OLI/Landsat-8*).

### Материалы и методы

Для сопоставления вторичных продуктов использован снимок части Черного моря в районе г. Новороссийска и г. Геленджика, сделанный сенсором ШМСА-ВР на КА «Ресурс-П № 1» (рис. 1). ШМСА-ВР позволяет измерять яркость излучения в пяти спектральных каналах (0,43...0,51; 0,51...0,58; 0,60...0,70; 0,70...0,90; 0,80...0,90 мкм) с пространственным разрешением 24 м, а в панхроматическом режиме – с пространственным разрешением 12 м. Для обеспечения высокого уровня соотношения сигнал/шум в ШМСА-ВР используется методика съемки с переменным временем экспозиции, величина которого зависит от чувствительности спектральных каналов, от углов съемки и Солнца, от альbedo подстилающей поверхности [10].



Рис. 1. Фрагмент полноцветного (*true-color*) изображения ШМСА-ВР

Fig. 1. WSME-HR *true-color* image fragment

Периодичность съемки – один раз в трое суток. Совместное использование трех спутников типа «Ресурс-П», находящихся в настоящее время на орбите, позволяет получать данные высокого пространственного разрешения не реже одного раза в сутки, что представляет особый интерес для мониторинга прибрежных вод, эстуариев, озер и рек.

Нормализованная яркость  $nL_w(\lambda)$  по данным ШМСА-ВР в ББП пересчитывается для длин волн 412, 443, 488, 531, 555 и 667 нм, соответствующих номинальным длинам волн видимого диапазона сканеров *MODIS*, установленных на спутниках *NASA Aqua* и *Terra*. Приведение к этим длинам волн делает удобным сопоставление продуктов цвета океана, полученных с помощью указанных сканеров. Принимая во внимание, что в течение всего периода эксплуатации спутников *NASA* производится валидация продуктов цвета океана, в результате сопоставления можно сделать выводы о качестве продуктов по данным российского спутника.

Для сравнения вторичных продуктов ШМСА-ВР выбраны ближайшие по времени снимки спутников *Aqua*, *Terra*, *Landsat-8* (таблица). Снимки

обрабатываются в программе *SeaDAS*, разработанной *NASA Ocean Biology Processing Group (OBPG)* для определения продуктов цвета океана по данным различных спектрорадиометров (*CZCS*, *SeaWiFS*, *MODIS*, *MERIS*, *VIIRS*, *OLI* и др.) [1, 11]. Атмосферная коррекция выполняется по стандартной методике [11–13], которую применяет *NASA* в оперативном режиме. Выбор параметров аэрозоля осуществляется по десяти моделям аэрозоля [14] с использованием информации о яркости на верхней границе атмосферы на двух длинах волн в ближнем инфракрасном диапазоне. Для снимков *MODIS* в работе выбирались длины волн 748 и 869 нм, а для снимков *OLI* – 865 и 2201 нм. В оптически сложных водах, где яркость, восходящая из водной толщи, в ближнем инфракрасном диапазоне не может считаться пренебрежимо малой, для оценки ее величин использовалась оптическая модель [15].

Т а б л и ц а  
T a b l e

**Характеристики используемых снимков**  
**Characteristics of the Images Used**

Сенсор/спутник / Sensor/Satellite	Имя снимка / Image Title	Дата/Время / Date/Time
Ресурс-П № 1/ШМСА-ВР/ Resurs-P No.1/WSME-HR	<i>RP1.SVR.10000955508001.L2A</i>	2015-03-10/ 11:16
<i>MODIS/Terra</i>	<i>T2015069083500.L0_LAC</i>	2015-03-10/ 08:35
<i>MODIS/Aqua</i>	<i>A2015069102000.L0_LAC</i>	2015-03-10/ 10:20
<i>OLI/Landsat-8</i>	<i>LC81750292015070LGN00</i>	2015-03-11/ 08:13

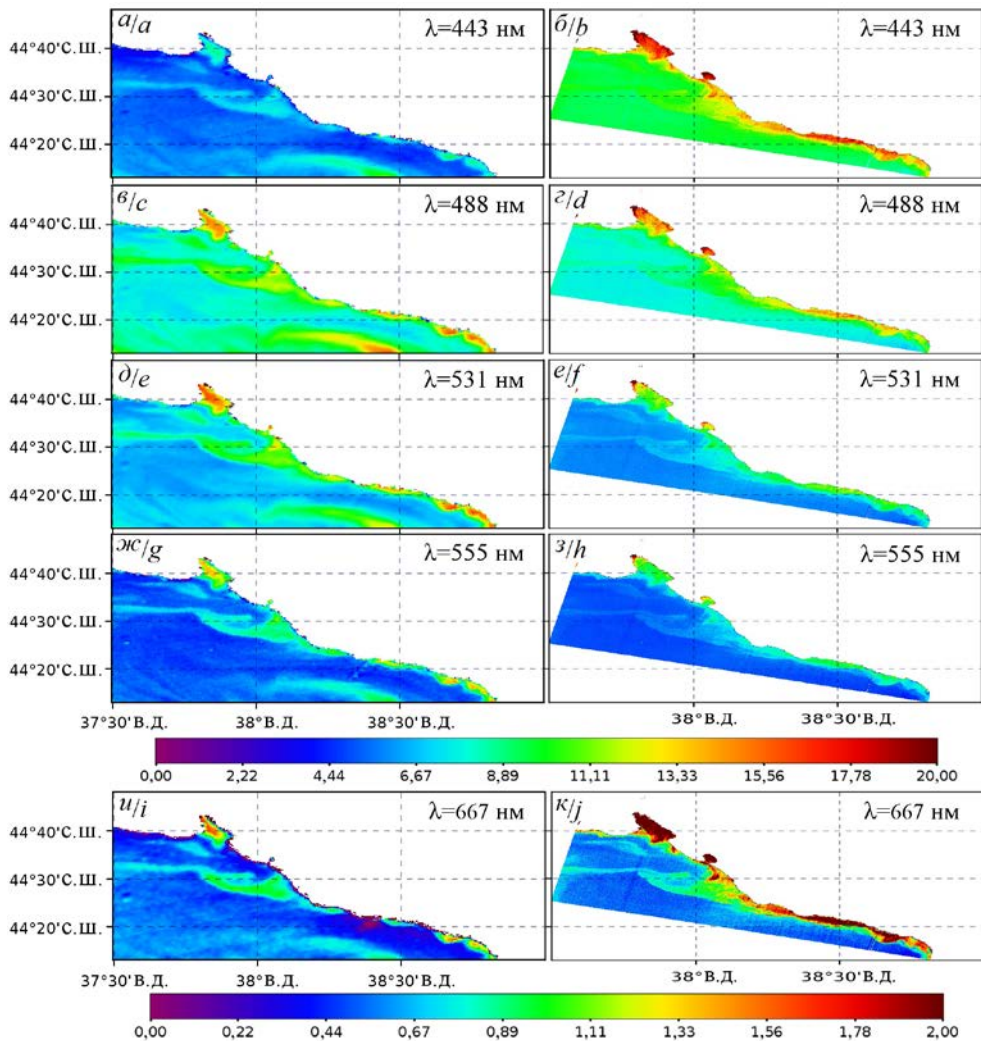
Пространственное разрешение сопоставляемых продуктов равнялось для сенсора *OLI* ~ 30 м, для ШМСА-ВР – 100 м. Данные всех спектральных каналов *MODIS (Aqua и Terra)* были проинтерполированы на сетку 250 м.

**Результаты и обсуждение**

На рис. 2 представлено пространственное распределение нормализованной спектральной яркости водной толщи  $nL_w(\lambda)$  по данным сенсора ШМСА-ВР и наиболее близким к ним данным *MODIS/Aqua*. Данные *MODIS/Terra* и *Landsat-8* на рис. 2 не приводятся, потому что сходны с пространственным распределением  $nL_w(\lambda)$  по данным *MODIS/Aqua*.

На рис. 3 показано частотное распределение значений нормализованной яркости на длинах волн 412, 443, 488, 531, 555 и 667 нм для сенсоров ШМСА-ВР, *MODIS* и *OLI*, построенное по одинаковой области снимков, соответствующей маске воды снимка ШМСА-ВР (см. рис. 1). На рис. 4 приведены спектры осредненной по площади нормализованной яркости водной толщи  $nL_w(\lambda)$  по данным четырех сенсоров. Осреднение выполнялось по одинаковой области снимков, определенной по маске воды снимка ШМСА-ВР.

Как видно из этих рисунков, в синей области спектра на длинах волн 412 и 443 нм значения  $nL_w(\lambda)$  по данным российского спутника существенно отличаются от аналогичных значений по данным зарубежных спутников. Так, на длине волны 412 нм  $nL_w(\lambda)$  по данным ШМСА-ВР больше, чем по данным зарубежных сенсоров примерно в пять раз (рис. 3, а), а на длине волны 443 нм – примерно в 1,5...2 раза (рис. 2, а, б; 3, б) при сходности формы кривой частотного распределения. Средние по площади значения  $nL_w(\lambda)$  (рис. 4) на длинах волн 412 и 443 нм по данным зарубежных сканеров примерно составляют 2 и 6 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) соответственно в то время, как для ШМСА-ВР эти значения равны соответственно 10,5 и 10,9 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср).



**Рис. 2.** Нормализованная яркость  $nL_w(\lambda)$ , Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) на длинах волн 443, 488, 531, 555 и 667 нм: а, в, д, ж, и – по данным MODIS/Aqua; б, з, е, з, к – по данным ШМСА-ВР

**Fig. 2.** Normalized radiance  $nL_w(\lambda)$ , W/(m<sup>2</sup>·μм·ср) on 443, 488, 531, 555 and 667 nm wavelength: а, с, е, г, i – according to MODIS/Aqua data; б, d, f, h, j – according to WSME-HR data

С увеличением длины волны максимумы кривых частотного распределения у всех сенсоров практически совпадают. Так, средние значения  $nL_w(488)$  хорошо согласуются с данными зарубежных сенсоров (рис. 4) и составляют 9,0; 8,9; 9,4 и 10,3 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) для ШМСА-ВР, *MODIS/Aqua*, *MODIS/Terra* и *OLI* соответственно. Как видно из пространственного и частотного распределений (рис. 2, в, г; 3, в), в районе Цемесской и Геленджикской бухт значения  $nL_w(488)$  по данным ШМСА-ВР превышают значения  $nL_w(488)$  по данным *MODIS/Aqua*, но в других областях снимка в целом они незначительно меньше.

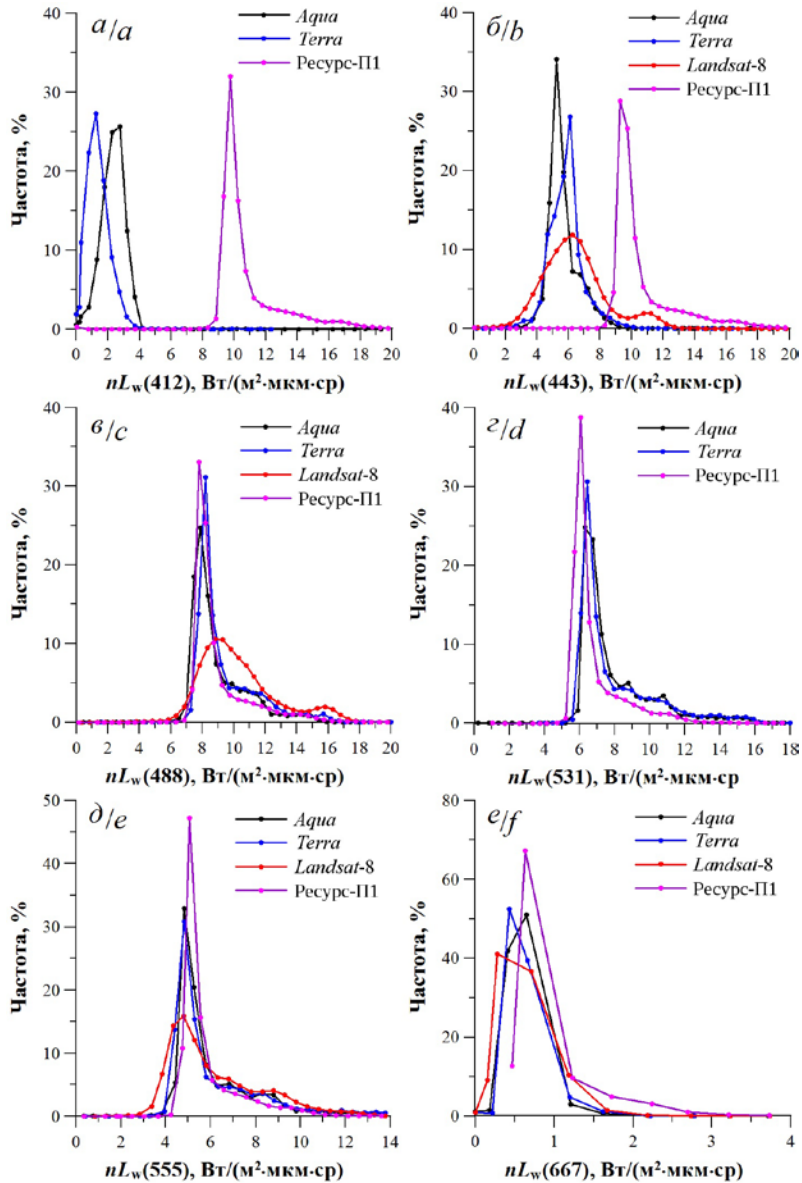


Рис. 3. Частотное распределение значений нормализованной яркости  $nL_w(\lambda)$

Fig. 3. Frequency distribution of normalized radiance  $nL_w(\lambda)$

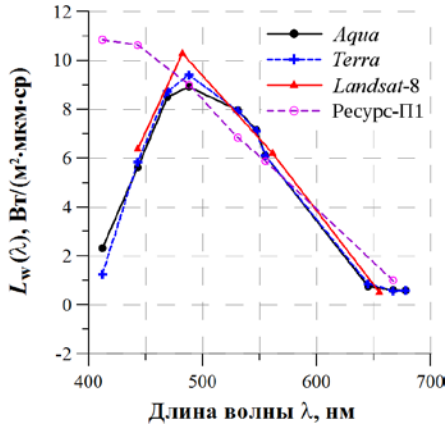
В зеленой области спектра на длинах волны 531 и 555 нм для всех сенсоров наблюдается сходное пространственное распределение нормализованной яркости (рис. 2,  $\delta - \varepsilon$ ; 3,  $\delta$ ;  $\varepsilon$ ).

На длине волны 531 нм значения  $nL_w(531)$  по данным ШМСА-ВР примерно на 15–20 % меньше, чем по данным *MODIS* (рис. 2,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ) и других сенсоров (рис. 3,  $\varepsilon$ ). Средние по площади значения  $nL_w(531)$  (рис. 4) составляют 6,8; 8; 8 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) для ШМСА-ВР, *MODIS/Aqua* и *MODIS/Terra* соответственно. На длине волны 555 нм картины пространственного распределения нормализованной яркости по данным всех сенсоров имеют наилучшее совпадение (рис. 2,  $\varepsilon$ ; 3,  $\delta$ ). Средние значения  $nL_w(555)$  (рис. 4) равны 5,9; 6,1; 6,1; 6,2 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) для ШМСА-ВР, *MODIS/Aqua*, *MODIS/Terra* и *OLI* соответственно.

В красной области спектра снова наблюдается увеличение нормализованной яркости по данным ШМСА-ВР по отношению к данным других сенсоров. Как видно из рис. 2,  $u$ ,  $\kappa$  и 3,  $e$ , значения  $nL_w(667)$  по данным ШМСА-ВР примерно в два раза превышают значения  $nL_w(667)$  по данным зарубежных сенсоров. В районе Цемесской и Геленджикской бухт максимальные значения  $nL_w(667)$  по данным ШМСА-ВР составляют 2,5...3,5 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) (рис. 2,  $\kappa$ ), по данным *MODIS/Aqua* – 0,8...1,6 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср). В береговой зоне значения нормализованной яркости по данным ШМСА-ВР и *MODIS/Aqua* находятся в диапазоне 1,6...3,0 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) и 0,5...1,5 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) соответственно. Средние по площади снимка значения  $nL_w(667)$  равны 1,0; 0,6; 0,6; 0,5 Вт/(м<sup>2</sup>·μм·ср) для ШМСА-ВР, *MODIS/Aqua*, *MODIS/Terra* и *OLI* соответственно (рис. 4).

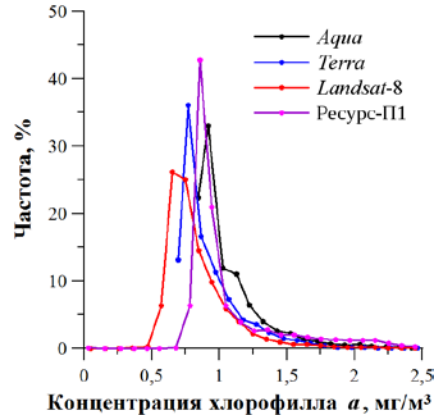
Спектральные зависимости (рис. 4) по данным зарубежных сканеров отражают характерные особенности нормализованной спектральной яркости водной толщи  $nL_w(\lambda)$  в морских водах с содержанием хлорофилла  $a$  более 0,1 мг/м<sup>3</sup>. В таких водах максимумы поглощения желтым веществом (продукт жизнедеятельности и распада фитопланктона) и пигментами фитопланктона находятся в диапазоне длин волн 400–450 нм. Эти компоненты поглощения морской воды обуславливают положение максимума восходящего из воды излучения  $L_w(\lambda)$  на длинах волн около 460–480 нм. В случае очень мутных вод максимум может смещаться в зеленую область спектра. На длинах волн 400–410 нм величины яркости  $nL_w(\lambda)$ , главным образом вследствие сильного поглощения желтым веществом, обычно составляют около 40–50 % от максимума. Спектр  $nL_w(\lambda)$  по данным ШМСА-ВР характерен для очень чистых океанских вод, концентрация хлорофилла  $a$  в которых не превышает 0,05 мг/м<sup>3</sup>. Поскольку разница во времени между снимками (кроме снимка *Landsat-8*) около 2–2,5 часов, то следовало бы также ожидать в синей области спектра аналогичного поведения спектральной зависимости  $nL_w(\lambda)$  по данным ШМСА-ВР. Однако значения  $nL_w(\lambda)$  на длинах волн 412 и 443 нм не только не уменьшаются в два раза, но и демонстрируют увеличение относительно значения  $nL_w(488)$ . Такое поведение  $nL_w(\lambda)$  явно противоречит наблюдениям, что может быть связано как с точностью радиометрической калибровки сенсора, так и с ошибками в алгоритмах восстановления  $nL_w(\lambda)$  из измеренной сенсором отраженной яркости на верхней границе атмосферы  $L_t(\lambda)$ .

Концентрация хлорофилла  $a$   $C_a$  рассчитывается по стандартному алгоритму *OC3 (OLI)* и *OC3M (MODIS)*, в котором используется отношение коэффициентов яркости моря  $R_{rs}$  в сине-зеленой области спектра [7]. Частотное распределение  $C_a$ ,  $\text{мг/м}^3$ , приведено на рис. 5, а пространственное – на рис. 6.



**Рис. 4.** Нормализованная спектральная яркость водной толщи  $nL_w(\lambda)$

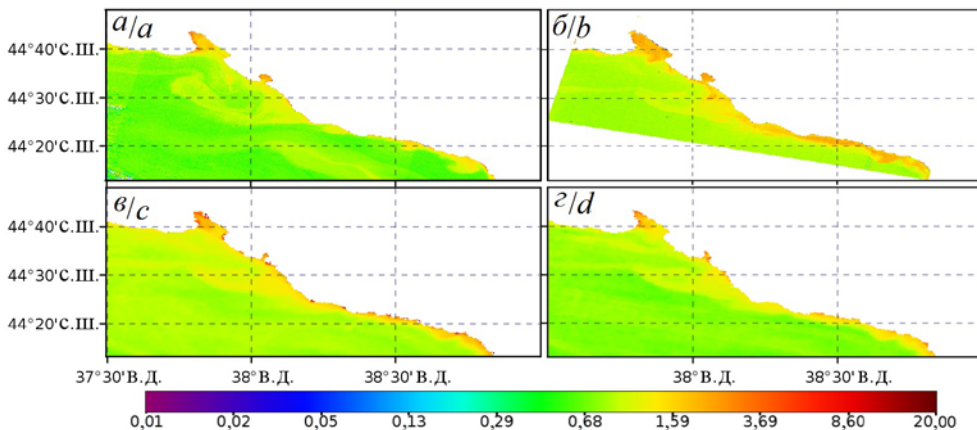
**Fig. 4.** Normalized water-leaving radiance spectra  $nL_w(\lambda)$



**Рис. 5.** Частотное распределение концентрации хлорофилла  $a$

**Fig. 5.** Frequency distribution of *chlorophyll a* concentration

Как видно из рис. 5, кривые частотного распределения имеют сходную форму. Смещение максимумов кривых, относительно которых средние по площади значения расположены правее, составляет не более 30 %. Также четко видно, что по данным сенсора ШМСА-ВР частота появления значений  $C_a > 1,6 \text{ мг/м}^3$  больше, чем по данным других сенсоров.



**Рис. 6.** Распределение концентрации хлорофилла  $a$   $C_a$ ,  $\text{мг/м}^3$ , по данным:  $a$  – *OLI*;  $b$  – ШМСА-ВР;  $c$  – *MODIS/Aqua*;  $d$  – *MODIS/Terra*

**Fig. 6.** Distribution of *chlorophyll a* concentration  $C_a$ ,  $\text{мг/м}^3$ , according to:  $a$  – *OLI*;  $b$  – *WSME-HR*;  $c$  – *MODIS/Aqua*;  $d$  – *MODIS/Terra*



Как видно из рис. 6, пространственное распределение  $C_a$  имеет сходную структуру и сопоставимые значения для всех сенсоров. Незначительные изменения на снимке *OLI* обусловлены почти суточной разницей с остальными снимками. Концентрация хлорофилла  $a$  по данным ШМСА-ВР в большей мере соответствует данным *MODIS/Aqua*. Средние значения  $C_a$ , рассчитанные для одинаковых по площади областей снимков, составляют 1,09; 0,93; 0,85 и 1,06 мг/м<sup>3</sup> для *Aqua*, *Terra*, *Landsat-8* и Ресурс-П соответственно. Максимальные значения  $C_a = 2...2,5$  мг/м<sup>3</sup> на снимках зарубежных спутников локализованы на части Цемесской и Геленджикской бухт и вдоль берегов ниже широты 44°25'. На снимке российского спутника максимальные значения  $C_a = 2...2,5$  мг/м<sup>3</sup> наблюдаются на всей площади бухт и на более широкой вдольбереговой области.

Таким образом, несмотря на различия в значениях нормализованной яркости, средние значения концентрации хлорофилла  $a$  для анализируемых сенсоров хорошо согласуются друг с другом. Вариации в пространственном распределении хлорофилла  $a$  в прибрежной зоне могут быть объяснены в равной степени разницей значений  $nL_w(\lambda)$ , пространственным осреднением и необходимостью корректировки коэффициентов полинома методики *ОСЗМ*, изначально подобранных для сканеров *MODIS*, для сенсора ШМСА-ВР.

### Выводы

1. Высокое пространственное и временное разрешение снимков ШМСА-ВР КА типа «Ресурс-П» делает привлекательными данные их измерений при решении широкого ряда задач спутниковой гидрофизики, в частности исследования оптических свойств вод, их состава и биопродуктивности, динамики изменения берегов и др.

2. Сравнение продуктов, полученных по снимку сенсора ШМСА-ВР космического аппарата «Ресурс-П №1», с аналогичными продуктами зарубежных оптических сенсоров цвета океана, выявило следующие особенности. Значения нормализованной спектральной яркости водной толщи по данным ШМСА-ВР в синей (412 и 443 нм) и красной области спектра значительно выше, чем по данным *MODIS*, а в зеленой области достаточно хорошо согласуются с ними. Оценки хлорофилла  $a$  по данным сравниваемых спектрорадиометров имеют близкие значения. Близость результатов объясняется минимальными различиями в значениях нормализованной яркости водной толщи на длинах волн 488 и 555 нм, которые используются для расчета хлорофилла  $a$ .

3. Естественно, результатов данной работы недостаточно, чтобы сделать окончательные выводы о точности продуктов сенсора ШМСА-ВР и возможности их использования для решения задач спутниковой гидрофизики. Для этой цели требуются длительные наблюдения всей акватории Черного моря всеми тремя спутниками типа «Ресурс-П». К сожалению, космическая съемка в достаточном объеме с этих спутников не ведется, а отснятые сцены отсутствуют в открытом доступе, что затрудняет выполнение такого анализа.

Работа выполнена в рамках темы №1002-2014-0011 «Исследования закономерностей изменения состояния морской среды на основе оперативных наблюдений и данных системы диагноза, прогноза и реанализа состояния морских акваторий» (р/н НИОКР 115061510036).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ocean color measurements with the Operational Land Imager on Landsat-8: implementation and evaluation in SeaDAS / B. A. Franz [et al.] // *J. Appl. Remote Sens.* 2015. Vol. 9, no. 1. 096070. doi:10.1117/1.JRS.9.096070
2. *Vanhellemont Q., Ruddick K.* Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8 // *Remote Sens. Environ.* 2014. Vol. 145. P. 105–115. doi:10.1016/j.rse.2014.01.009
3. Water quality retrievals from combined Landsat TM Data and ERS-2 SAR data in the Gulf of Finland / Y. Zhang [et al.] // *IEEE T. Geosci. Remote.* 2003. Vol. 41, iss. 3. P. 622–629. doi:10.1109/TGRS.2003.808906
4. Calibration/validation of Landsat-derived ocean colour products in Boston Harbour / N. Pahlevan [et al.] // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. Göttingen : Copernicus Publications*, 2016. Vol. XLI-B8. P. 1165–1168. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B8-1165-2016>
5. Retrieval of suspended sediment concentrations in large turbid rivers using Landsat ETM+: an example from the Yangtze River, China / J.-J. Wang [et al.] // *Earth Surf. Process. Landforms.* 2009. Vol. 34, iss. 8. P. 1082–1092. doi:10.1002/esp.1795
6. Assessment of total suspended sediment concentrations in Poyang Lake using HJ-1A/1B CCD imagery / Z. Yu [et al.] // *Chin. J. Ocean. Limnol.* 2012. Vol. 30, iss. 2. P. 295–304. doi:10.1007/s00343-012-1094-y
7. Remote-sensing monitoring for spatio-temporal dynamics of sand dredging activities at Poyang Lake in China / J. Li [et al.] // *Int. J. Remote Sens.* 2014. Vol. 35, iss. 16. P. 6004–6022. doi:10.1080/01431161.2014.939783
8. Программные технологии создания и распространения базовых продуктов дистанционного зондирования Земли / А. И. Васильев [и др.] // *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы.* 2015. Т. 2, вып. 3. С. 23–32. URL: [http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2017/10/3\\_p23\\_020315.pdf](http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2017/10/3_p23_020315.pdf) (дата обращения: 04.09.2017).
9. Архитектура геоинформационного сервиса «Банк базовых продуктов» / А. Н. Марков [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2016. Т. 13, № 5. С. 39–51. doi:10.21046/2070-7401-2016-13-5-39-51
10. КШМСА – комплекс широкозахватной мультиспектральной аппаратуры космического аппарата «Ресурс-П» / А. И. Бакланов [и др.] // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. ак. С. П. Королёва.* 2016. Vol. 15, № 2. С. 22–29. doi:10.18287/2412-7329-2016-15-2-22-29
11. Atmospheric Correction for Remotely-Sensed Ocean-Colour Products / M. Wang (ed.). Dartmouth, Canada : IOCCG, 2010. 78 p. (Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 10). URL: <http://ioccg.org/reports/report10.pdf> (дата обращения: 04.09.2017).
12. Atmospheric Correction for Satellite Ocean Color Radiometry / C. D. Mobley [et al.]. Greenbelt, MD, USA : NASA Goddard Space Flight Center, 2016. 75 p. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/technical/NASA-TM-2016-217551.pdf> (дата обращения: 04.09.2017).

13. Algorithm Description of the Standard Ocean Color Products: [сайт]. URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd> (дата обращения: 04.09.2017).
14. New aerosol models for the retrieval of aerosol optical thickness and normalized water-leaving radiances from the SeaWiFS and MODIS sensors over coastal regions and open oceans / Z. Ahmad [et al.] // Appl. Opt. 2010. Vol. 49, iss. 29. P. 5545–5560. <https://doi.org/10.1364/AO.49.005545>
15. Bailey S. W., Franz B. A., Werdell P. J. Estimation of near-infrared water-leaving reflectance for satellite ocean color data processing // Optics Express. 2010. Vol. 18, iss. 7. P. 7521–7527. <https://doi.org/10.1364/OE.18.007521>

*Сведения об авторе.*

**Федоров Сергей Вячеславович**, старший научный сотрудник отдела дистанционных методов исследования ФГБУН МГИ (Севастополь, Россия), кандидат технических наук, ORCID: 0000-0001-7716-7456, s.fedorov@mhi-ras.ru.

## Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели

Г. К. Коротаев, В. В. Кныш\*, П. Н. Лишаев, С. Г. Демышев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*E-mail: vaknysh@yandex.ru*

Поступила в редакцию 08.09.2017 г.

Для ассимиляции псевдоизмерений термохалинных параметров в модели использовался метод адаптивной статистики, характерной чертой которого является согласование трехмерных дисперсий ошибок прогноза температуры и солености с циркуляцией вод бассейна. Трехмерные поля псевдоизмерений температуры и солености восстановлены в слое 100–500 м по данным альтиметрии и ограниченных измерений буев *Argo*. Апробация и валидация метода проводились посредством сопоставления воспроизведенных полей моря в реанализе за 2012 г. с измерениями *Argo*. Выявлено, что на горизонтах 100, 113 и 125 м дисперсии разностей (невязок) между псевдоизмерениями и модельными значениями температуры несколько больше модельной дисперсии, а на горизонтах слоя 150–500 м – меньше. Ежесуточное среднеквадратическое отклонение модельного уровня (относительно восстановленного по альтиметрии) меньше рассчитанного в прогнозе, а в период с марта по сентябрь меньше среднеквадратического отклонения, полученного с ассимиляцией псевдоизмерений по упрощенному методу. Разрешение мезомасштабных вихрей в полях течений более высокое при использовании метода адаптивной статистики.

**Ключевые слова:** адаптивная статистика, дисперсии ошибок прогноза, псевдоизмерения, валидация, дисперсии невязок.

**Для цитирования:** Применение метода адаптивной статистики для реанализа полей Черного моря с ассимиляцией псевдоизмерений температуры и солености в модели / Г. К. Коротаев [и др.] // Морской гидрофизический журнал. Т. 34, № 1. С. 40–56. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-40-56

## Application of the adaptive statistics method for reanalysis of the Black Sea fields including assimilation of the temperature and salinity pseudo-measurements in the model

G. K. Korotaev, V. V. Knysh\*, P. N. Lishaev, S. G. Demyshev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*

*\*e-mail: vaknysh@yandex.ru*

To assimilate the thermohaline parameters' pseudo-measurements in the model, applied is the method of adaptive statistics, the characteristic feature of which consists in adjusting the three-dimensional errors' variances of the temperature and salinity forecast to the water circulation in the basin. The three-dimensional fields of the temperature and salinity pseudo-measurements are reconstructed in the 100–500 m layer based on the altimetry data and the *Argo* buoys' limited measurements. The method is approved and validated by comparing the reproduced sea fields in the reanalysis for 2012 with the *Argo* measurements. It is revealed that on the horizons 100, 113 and 125 m, variances of the differences (residuals) between the temperature pseudo-measurements and model values are somewhat higher than those in the model dispersion; whereas on the horizons within the 150–500 m layer, they are smaller. The daily standard deviation of the model level (relative to that reconstructed using the altimetry data) is smaller than the deviation calculated in the forecast; and during the March – September period, it is lower than the standard deviation obtained using the pseudo-measurements' assimilation by the simplified method. Resolution of the mesoscale vortices in the currents' fields is higher in case the adaptive statistics method is used.

**Keywords:** adaptive statistics, variance of forecast errors, pseudo-measurements, validation, dispersion of residuals.

**For citation:** Korotaev, G.K., Knysh, V.V., Lishaev, P.N. and Demyshev S.G., 2018. Application of the adaptive statistics method for reanalysis of the Black Sea fields including assimilation of the temperature and salinity pseudo-measurements in the model. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, 34(1), pp. 40-56. doi:10.22449/0233-7584-2018-1-40-56 (in Russian).