

УДК [574.58+581.132.1]:[551.46.06:629.783](261.243)

*Е.С. Кочеткова\**, *А.В. Исаев\*\**, *Т.Р. Ерёмкина\**

**ВАЛИДАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА  
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА А  
В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ФИНСКОГО ЗАЛИВА ПО ДАННЫМ  
СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

\* Российский государственный гидрометеорологический университет;

\*\* Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, isaev@rshu.ru

*E.S. Kochetkova, A.V. Isaev, T.R. Eremina*

**VALIDATION OF A REGIONAL ALGORITHM  
FOR THE CHLOROPHYLL A CONCENTRATION  
DETERMINATION IN THE EASTERN PART OF THE GULF  
OF FINLAND WITH SATELLITE MEASUREMENTS**

Статья посвящена анализу разработанных региональных алгоритмов для определения концентрации хлорофилла *a* по спутниковым данным в восточной части Финского залива. Для выбора и оценки качества регионального спутникового алгоритма в работе используются спутниковые данные и натурные измерения содержания хлорофилла *a* за десятилетний период. Показана возможность применения выбранного алгоритма для оценки межгодовой изменчивости хлорофилла *a*. Результаты, представленные в статье, могут быть использованы для оперативного мониторинга цветения цианобактерий в Финском заливе на основе спутниковых данных.

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, восточная часть Финского залива, спутниковые данные, региональный алгоритм.

The article is devoted to the analysis of the developed regional algorithms for determination of chlorophyll *a* concentration using satellite data in the eastern part of the Gulf of Finland. To select and evaluate the quality of a regional satellite algorithm for the determination of chlorophyll *a* concentration in the waters of the eastern part of the Gulf of Finland, satellite data and in-situ measurements over a ten-year period are used. The possibility of applying the chosen algorithm for estimating the interannual variability of chlorophyll *a* has been shown. The results presented in the article can be used for operative monitoring of cyanobacterial blooms in the Gulf of Finland on the basis of satellite data.

**Keywords:** chlorophyll *a*, eastern part of the Gulf of Finland, satellite data, regional algorithm.

## **Введение**

Финский залив является одним из самых эвтрофированных заливов Балтийского моря. Эвтрофикация проявляется в повышении продуктивности водоема и цветении фитопланктона. В качестве показателя интенсивности процесса эвтрофирования используется концентрация хлорофилла *a*. Этот показатель включен в программы мониторинга и является индикатором классификации трофического уровня вод различных районов Балтийского моря [4].

Для осуществления мониторинга эвтрофикации Балтийского моря в целом, в частности Финского залива, применяются данные спутникового зондирования,

по которым рассчитывается содержание хлорофилла в воде [6, 4]. Как показывает опыт российских и зарубежных исследователей, наилучшие результаты при оценке содержания хлорофилла *a* получены при использовании региональных алгоритмов, разработанных непосредственно для изучаемого водного объекта. Для вод восточной части Финского залива было предложено 8 региональных алгоритмов [5], полученных на основе подспутниковых экспериментов в период с 2012 по 2013 гг. Один из алгоритмов применялся для исследования циклов развития и затухания цветения фитопланктона в Балтийском море [1]. Однако верификация результатов расчетов по данным натурных наблюдений не выполнялась.

Целью настоящей работы является сравнение предложенных алгоритмов и верификация наиболее точного из них на независимых данных *in-situ*, а также выявление возможности использования выбранного алгоритма для оценки межгодовой изменчивости хлорофилла *a* в восточной части Финского залива.

### Материалы и методы

Для выбора и верификации регионального алгоритма оценки концентрации хлорофилла *a* по данным спутникового зондирования использовались данные натурных измерений, полученные в ходе ежегодных экспедиционных исследований РГГМУ в июле–августе в 2004–2013 гг. Пробы отбирались на станциях регулярного мониторинга восточной части Финского залива (рис. 1). Концентрация хлорофилла *a* в фотическом слое определялась спектрофотометрическим методом в соответствии с методикой ГОСТ 17.1.4.02–90.

Данные о восходящем излучении, считываемые сканером цвета морской поверхности, установленном на спутниковой платформе MODIS-Aqua, использовались для

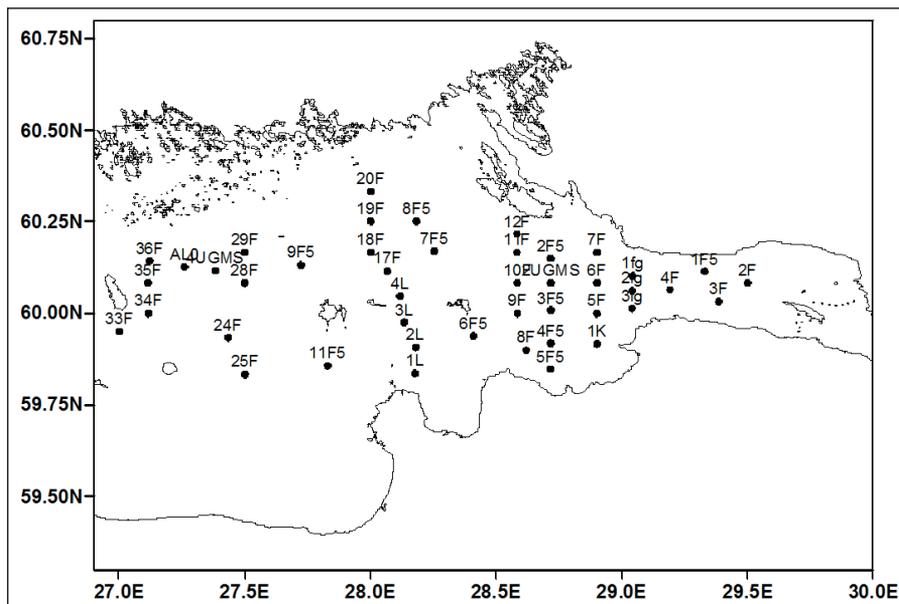


Рис. 1. Схема станций регулярного мониторинга

расчета концентраций хлорофилла *a* по региональному алгоритму. Географическую привязку и атмосферную коррекцию данных осуществляет Группа обработки морских биологических данных (OBPG) при Национальном управлении по авионавигации и исследованию космического пространства (NASA), которые доступны на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>.

Спутниковые данные представляют собой пространственную съемку с участка морской поверхности площадью около 2 км<sup>2</sup>, а по глубине ограничены прозрачностью места. Таким образом, данные спутникового зондирования представляют интегральную оценку по площади и в пределах некоторого слоя, ограниченного оптической проницаемостью излучения в данном месте, в то время как данные натуральных измерений дают точечное значение концентрации в фотическом слое.

### Региональный спутниковый алгоритм мониторинга хлорофилла *a*

Специальные региональные алгоритмы для района российской части Финского залива разрабатывались на основе данных о восходящем излучении и их сравнении с данными, принимаемыми на спутниковой платформе MODIS-Aqua. Как упоминалось выше, необходимость применения региональных алгоритмов для уникальных по биооптическим характеристикам вод обусловлена особенностями их формирования. Исследования проводились совместно РГГМУ и Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН в 2012–2013 гг. и их результаты опубликованы в работе [5].

По результатам проведенных подспутниковых измерений для регионального алгоритма был выбран параметр  $X = \lg[Rrs(547)/Rrs(531)]$ , где 547 нм и 531 нм — длины волн. Интенсивность излучения на этих длинах волн наиболее чувствительна к концентрации хлорофилла *a* на исследуемой акватории. Данные этих каналов были использованы в уравнении регрессии, в котором оценивалась связь значений измеренного in-situ хлорофилла *a* и параметра *X*. В работе [5] рассматривались как линейные (*Chl*), так и логарифмические параметры ( $\log Chl$ ) концентрации хлорофилла в регрессионных зависимостях первого и второго порядка, где *Chl* — это концентрация хлорофилла в мг/м<sup>3</sup>. В результате были получены следующие соотношения (1)–(8) [5]:

$$\text{№ 1 } Chl = 183X - 7,73; \quad (1)$$

$$\text{№ 2 } Chl = 277X - 12,21; \quad (2)$$

$$\text{№ 3 } Chl = 207X - 8,19; \quad (3)$$

$$\text{№ 4 } Chl = 1,65 - 72,6X + 1850X^2; \quad (4)$$

$$\text{№ 5 } \log Chl = 11,5X - 0,29; \quad (5)$$

$$\text{№ 6 } \log Chl = 18,4X - 0,52; \quad (6)$$

$$\text{№ 7 } \log Chl = 13,4X - 0,27; \quad (7)$$

$$\text{№ 8 } \log Chl = -0,50 + 19,8X - 42,7X^2. \quad (8)$$

Выражения (1)–(8) представляют собой региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла *a* по данным спутникового зондирования. Результаты анализа алгоритмов показали, что для 2012 и 2013 годов наилучшее согласование с натурными данными показали алгоритмы № 4 и 8. Для уточнения разработанных

алгоритмов необходимо использовать большие массивы данных подспутниковых наблюдений [5].

### Верификация регионального алгоритма

Для верификации алгоритма были выбраны 46 станций регулярного мониторинга РГГМУ. Результаты показали, что из всех представленных алгоритмов наиболее точным является алгоритм № 8. Для каждой станции, на которой выполнялись измерения хлорофилла *a*, проводились расчеты по региональному алгоритму № 8, в результате чего формировались пары: измеренное–рассчитанное значение. Также для сравнения алгоритмов использовались концентрации хлорофилла *a*, рассчитанные по стандартному алгоритму OBPГ (ОСЗМ). За период 2004–2013 гг. было получено 202 значения концентрации хлорофилла, но только 77 из них участвовали в анализе. Сокращение количества пар обусловлено наличием облачности во время проведения натуральных измерений, либо неудовлетворительной атмосферной коррекцией, либо завышением значений в мелководных районах.

Установлено, что концентрации хлорофилла *a*, полученные по стандартному алгоритму OBPГ, значительно завышают значения концентрации хлорофилла в воде (рис. 2). Максимальное превышение значения по ОСЗМ составило 8 мкг/л в 2004 г., а минимальное — 0,18 мкг/л. Сравнение абсолютных измеренных и рассчитанных значений показывает, что для Финского залива стандартный алгоритм сильно переоценивает содержание хлорофилла *a* на каналах сине-зеленого диапазона, особенно в период 2004–2007 гг.

Как видно на рис. 2, региональный алгоритм на протяжении всех 10 лет гораздо устойчивее согласуется с данными натуральных измерений по сравнению со стандартным алгоритмом. Тем не менее региональный алгоритм несколько занижает значения концентраций хлорофилла *a*, в среднем на 2,11 мкг/л. Это может



Рис. 2. Средние концентрации хлорофилла, рассчитанные для станций по данным натуральных измерений (ромб), стандартному алгоритму ОСЗМ (крест) и региональному алгоритму (столбик)

быть связано с вынужденным пространственным осреднением, в силу технических особенностей измерения со спутника.

Следует отметить, что в период с 2007 по 2013 г. средние значения, полученные по стандартному алгоритму, дают меньшее завышение значений хлорофилла *a*. Однако при этом корреляционная связь в отдельные годы (2009, 2010 и 2013) достаточно слабая и составляет не более 0,18 (рис. 3), что, возможно, обусловлено значительным снижением содержания хлорофилла *a*, отмечаемого начиная с 2006 г. [2, 3]. Вместе с тем анализ корреляционной связи показывает, что по региональному алгоритму коэффициент корреляции сохраняется в пределах 0,64–0,96 за весь период расчета.

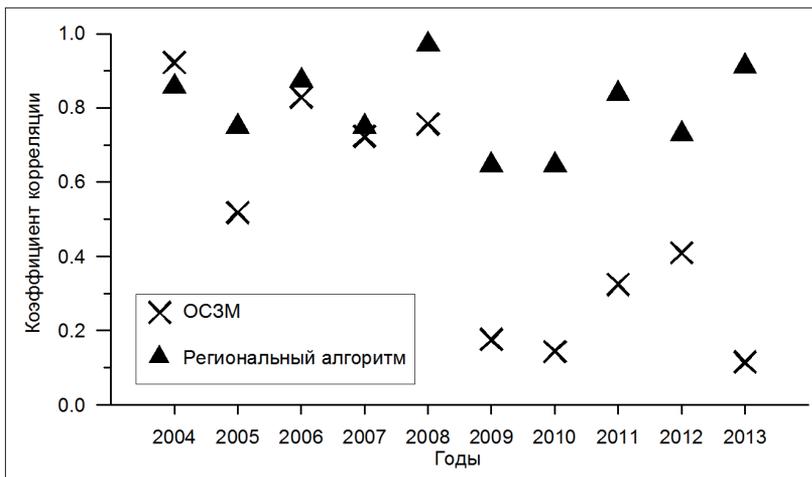


Рис. 3. Корреляционная связь между рассчитанными и измеренными значениями концентраций хлорофилла *a* за период 2004–2013 гг. для стандартного (ОСЗМ) и регионального алгоритмов

### Заключение

Верификация регионального спутникового алгоритма по данным за 2004–2013 гг. показала, что ошибка применения выбранного алгоритма для определения концентрации хлорофилла *a* в водах восточной части Финского залива в среднем составляет около 20 %. Этот результат совпадает с оценкой погрешности, рассчитанной по данным 2012–2013 гг., на основе которых разрабатывался этот алгоритм. Согласно выводам, представленным в [5], 17 % погрешности обусловлены ошибками атмосферной коррекции.

Оценка качества регионального алгоритма на основе независимых данных природных исследований за многолетний период 2003–2014 гг. показала, что региональный алгоритм занижает значения концентраций хлорофилла *a* в среднем на 2,11 мкг/л с максимальным отклонением на 4,9 мкг/л. Корреляционная связь значений, полученных по региональному алгоритму и натурным измерениям, составила 0,61. При этом корреляционная связь сохранялась высокой за весь

период расчетов, что показывает возможность использования алгоритма для изучения межгодовой изменчивости хлорофилла *a* на акватории восточной части Финского залива.

Таким образом, можно утверждать, что погрешность применения регионального алгоритма не является препятствием для его использования при оценке изменчивости хлорофилла *a* в восточной части Финского залива.

Работа выполнена в рамках осуществления научной деятельности по базовой части государственного задания № 5.6010.2017/8.9 Министерства образования и науки РФ.

### *Литература*

1. *Евтушенко Н.В., Шеберстов С.В.* Использование данных спутникового сканера MODIS-Aqua для исследования циклов цветения фитопланктона в Балтийском море // Совр. проблемы дистанц. зондир. Земли из космоса. 2016. Т. 13(3). — С. 114–124.
2. *Максимов А.А., Ерёмкина Т.Р., Ланге Е.К., Литвинчук Л.Ф., Максимова О.Б.* Режимная перестройка экосистемы восточной части Финского залива вследствие инвазии полихеты *Marenzelleria arc-tica* // Океанология. 2014. Т. 54. № 1. — С. 52–59.
3. *Шатрова О.В., Ерёмкина Т.Р., Ланге Е.К.* Анализ изменчивости параметров эвтрофирования в Финском заливе по данным натурных наблюдений // Учен. зап. РГГМУ. 2016. № 44. — С. 129–140.
4. *Raateoja M., Setälä O.* The Gulf of Finland assessment. — Helsinki. 2016. S. 386.
5. *Vazyulya S., Khrapko A., Kopelevich O., Burenkov V., Eremina T., Isaev A.* Regional algorithms for the estimation of chlorophyll and suspended matter concentration in the Gulf of Finland from MODIS-Aqua satellite data // Oceanologia. 2014. Т. 56(4). S. 737–756.
6. *Woźniak H., Krezel A., Darecki M., Woźniak S. B., Majchrowski R., Ostrowska M., Dera J.* Algorithm for the remote sensing of the Baltic ecosystem (DESAMBEM). Part 1: Mathematical apparatus // Oceanologia. 2008. Т. 50 (4). S. 451–508.