

УДК 551.468

© С. В. Вазюля*, С. В. Шеберстов, 2022

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Нахимовский пр., д. 36, г. Москва, Россия

*E-mail: svershova@mail.ru

АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ БИООПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ФИНСКОМ ЗАЛИВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Статья поступила в редакцию 01.03.2022, после доработки 29.08.2022, принята в печать 05.09.2022

Аннотация

Представлены результаты проверки возможности использования эмпирических ортогональных функций для разработки алгоритмов оценки концентрации хлорофилла-*a* и взвеси, биомассы цианобактерий в восточной части Финского залива. Для разработки алгоритмов использовался массив данных натуральных измерений коэффициента яркости водной толщи 2012–2014 гг., проведенных одновременно с прямыми определениями биооптических характеристик. Оказалось, что в случае концентрации хлорофилла-*a* и взвеси, такие алгоритмы можно создать не только при использовании гиперспектральных коэффициентов яркости моря, но и для спектральных каналов спутниковых сканеров цвета MODIS и OLCI. Для оценки биомассы цианобактерий методика применения эмпирических ортогональных функций в случае использования спутниковых каналов неприменима. Было также проведено исследование возможности исключения из расчетов коротковолновых каналов MODIS, наиболее подверженных ошибкам атмосферной коррекции. Оказалось, что концентрация хлорофилла-*a*, более чувствительна к таким изменениям, чем концентрация взвеси. Валидация по данным MODIS показала, что алгоритмы с использованием эмпирических ортогональных функций, дают результаты не хуже, чем регрессионные.

Ключевые слова: эмпирические ортогональные функции, хлорофилл, взвесь, цианобактерии, Финский залив, спутниковые данные, MODIS, OLCI

© S. V. Vazyulya, S. V. Sheberstov, 2022

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, 117997, Nakhimovsky prospect, 36, Moscow, Russia

*E-mail: svershova@mail.ru

ALGORITHMS FOR EVALUATION OF BIOOPTICAL CHARACTERISTICS IN THE GULF OF FINLAND USING EMPIRICAL ORTHOGONAL FUNCTIONS

Received 01.03.2022; Revised 29.08.2022; Accepted 05.09.2022

Abstract

The paper presents the results of testing the possibility of using empirical orthogonal functions to develop algorithms for estimating the concentration of chlorophyll *a* and suspended matter, the biomass of cyanobacteria in the eastern part of the Gulf of Finland. To develop the algorithms, we used an array of data from field measurements of the subsurface radiance reflectance in 2012–2014, carried out simultaneously with the determination of bio-optical characteristics. It turned out that in the case of the concentration of chlorophyll *a* and suspended matter, such algorithms can be created not only using the hyperspectral radiance reflectance, but also for the spectral channels of satellite color scanners MODIS and OLCI. An estimation of the cyanobacteria biomass with the empirical orthogonal functions method is not applicable in the case of using satellite channels. A study of the possibility of the most prone to atmospheric correction errors shortwave MODIS channels exclusion was also made. It turned out that the concentration of chlorophyll *a* is more sensitive to such exclusion than the concentration of suspended matter. Validation on a MODIS data showed that empirical orthogonal functions algorithms give results no worse than regression ones.

Keywords: empirical orthogonal functions, chlorophyll, suspended matter, cyanobacteria, Gulf of Finland, satellite data, MODIS, OLCI

Ссылка для цитирования: Вазюля С.В., Шеберстов С.В. Алгоритмы оценки биооптических характеристик в Финском заливе с использованием эмпирических ортогональных функций // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2022. Т. 15, № 3. С. 84–96. doi:10.48612/fpg/vdeu-bvnr-rxb8

For citation: Vazyulya S.V., Sheberstov S.V. Algorithms for Evaluation of Biooptical Characteristics in the Gulf of Finland Using Empirical Orthogonal Functions. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 3, 84–96. doi:10.48612/fpg/vdeu-bvnr-rxb8

1. Введение

В 2012–2014 гг. сотрудники Лаборатории оптики океана Института океанологии (ИО РАН) участвовали в экспедициях в восточной части Финского залива, проводимых ежегодно Российским государственным гидрометеорологическим университетом для мониторинга экологического состояния этой акватории [1–4]. В результате был получен набор данных оптических измерений, проведенных одновременно с определением таких биооптических характеристик поверхностного слоя воды как биомасса цианобактерий (*Vcyan*), концентрация хлорофилла-*a* (*Chl*) и взвеси (*TSM*). Эти материалы позволили разработать региональные алгоритмы для оценки *Chl*, *TSM*, *Vcyan* по данным спутникового сканера цвета океана MODIS [5, 6], которые успешно используются в атласе биооптических характеристик Лаборатории оптики океана ИО РАН [7]. При разработке алгоритмов оценки концентраций хлорофилла *a* и взвеси [5] использовался классический регрессионный подход, хорошо зарекомендовавший себя в различных морях [7]: для расчета значений *Chl* используется уравнение регрессии с индексом цвета, а для *TSM* с показателем рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} . В алгоритме оценки *Vcyan* рассчитывалась множественная регрессия с величинами *Chl* и b_{bp} [6].

Известно, что для определения биооптических характеристик морской воды можно также использовать статистический подход [8], основанный на использовании в качестве базиса эмпирических ортогональных функций (ЭОФ). Такая методика позволила создать алгоритмы для оценки различных биооптических характеристик морской воды: показателя диффузного ослабления ультрафиолетового света [9], концентрации хлорофилла [10, 11] и неорганического углерода [12]. На одном и том же массиве данных измерений в Гданьском заливе Балтийского моря были разработаны алгоритмы определения концентрации фикоцианина как с помощью классического подхода [13], так и с использованием ЭОФ [14]. В настоящей работе представлены результаты проверки возможности использования ЭОФ для разработки алгоритмов оценки *Chl*, *TSM*, *Vcyan* в восточной части Финского залива.

2. Материалы и методика

2.1. Используемые данные

Для расчёта эмпирических ортогональных функций для спектров яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ были использованы данные судовых измерений коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, пересчитанные в $R_{rs}(\lambda)$ при помощи формул [15]. Для измерения спектрального коэффициента яркости $\rho(\lambda)$ использовался плавающий спектрорадиометр [16]. Спектральный диапазон измерений 400–700 нм, разрешение — 2 нм, точность измерения — 5%. На рис. 1 показан весь массив используемых спектров $R_{rs}(\lambda)$, полученный для 65 станций в ходе летних экспедиций на малом парусном катамаране CENTAURUS II в акватории восточной части Финского залива между островами Котлин и Гогланд в период 2012–2014 гг. [5, 6]. Так же на этом рисунке показаны средний спектр $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ и спектры $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle \pm \Delta R_{rs}(\lambda)$, где $\Delta R_{rs}(\lambda)$ — среднеквадратичное отклонение. Представленные спектры варьируют как по амплитуде, так и по форме спектра. Но практически на всех спектрах, включая средний, можно заметить минимум вблизи 620 нм и максимум вблизи 650 нм, первый соответствует максимуму поглощения фикоцианином, а второй связан с флуоресценцией этого пигмента. Проявление фикоцианина в спектрах $R_{rs}(\lambda)$ свидетельствует об интенсивном цветении цианобактерий в Финском заливе [3, 17, 18].

Кроме того, набор *in situ* данных включает значения прямых определений биомассы цианобактерий, концентраций хлорофилла-*a* и взвеси, выполненных в фотическом слое. Концентрация хлорофилла-*a* определялась спектрофотометрическим методом в соответствии с методикой [19], взвеси — стандартным методом фильтрации под вакуумом 0,4 атм с помощью мембранных ядерных фильтров с диаметром пор 0,45 мкм.

Для определения *Vcyan* пробы концентрировали методом седиментации до 10 мл. Фитопланктон идентифицировали и подсчитывали под микроскопом при увеличении 256х и 640х. Учитывались все отделы фитопланктона, включая цианобактерии. Применялись номенклатура фитопланктона и формула расчета индивидуальных объемов, используемые в международной программе мониторинга Балтийского моря (<http://www.ices.dk/marine-data/dataportal/Pages/DOME.aspx>). Биомасса рассчитывались исходя из соответствующего объема счетных единиц фитопланктона, принимая, что 10^9 мкм³ соответствует 1 мг сырой биомассы.

Следуя ранее опубликованным работам по разработке региональных алгоритмов [5, 6], при оценке применимости ЭОФ для определения биомассы цианобактерий были использованы данные, полученные на 28-ми станциях, где величина *Vcyan* превышала 20 мг м⁻³ [6], а в случае концентраций *Chl* и *TSM* данные

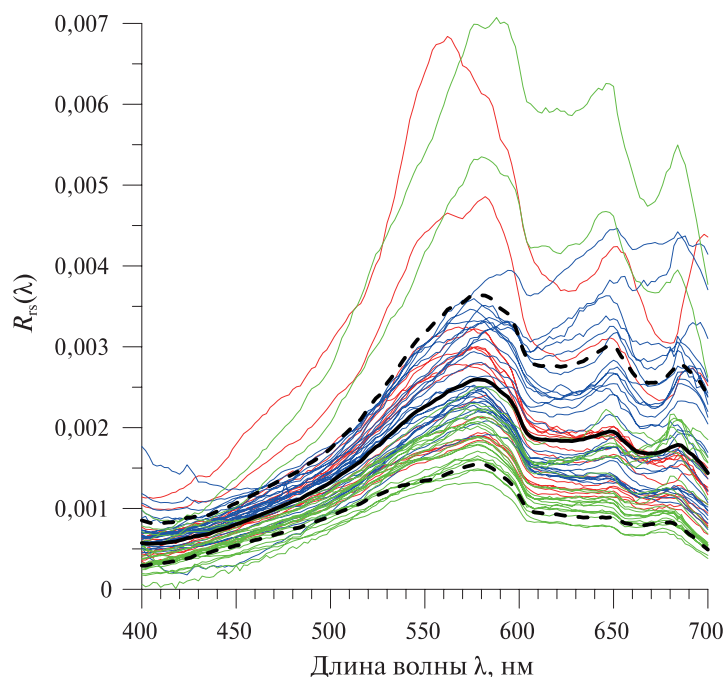


Рис. 1. Спектры $R_{rs}(\lambda)$, использованные для расчета эмпирических ортогональных функций: красные тонкие линии — измерения 2012 г., синие — 2013 г., зеленые — 2014 г. Жирной черной линией показан средний спектр $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$, а пунктирными линиями — спектры $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle \pm \Delta R_{rs}(\lambda)$. Измерения выполнены в восточной части Финского залива

Fig. 1. Spectra $R_{rs}(\lambda)$, which were used to calculate the empirical orthogonal functions: red thin lines — measurements in 2012, blue lines — 2013, green lines — 2014. The thick black line shows the average $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ spectrum, and the dotted lines show the spectra $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle \pm \Delta R_{rs}(\lambda)$. The measurements were taken in the eastern part of the Gulf of Finland

2012–2013 гг. соответственно для 40 и 39 станций [5]. Таким образом, для отобранных станций диапазон изменчивости V_{cyan} составил 20–2065 mg m^{-3} , концентрации хлорофилла 1,2–23,7 mg m^{-3} , концентрации взвеси 1,0–5,5 mg l^{-1} .

Во время экспедиций 2012–2013 гг. из-за облачности подспутниковые измерения получилось провести только 27 июля 2012 г. и 26, 27, 29 июля 2013 г. Для валидации регрессионных алгоритмов оценки Chl и TSM [5] было отобрано десять станций (3 в 2012 г. и 7 в 2013 г.), для которых были получены как натурные спектры $R_{rs}(\lambda)$, так и по данным MODIS-Aqua. В нашем исследовании для валидации алгоритмов был использован этот же массив спутниковых данных.

Для тестового расчета распределений биооптических характеристик были использованы данные MODIS-Aqua второго уровня, полученные 22 июля 2012 г 11:15 GMT. Расчет проводился при помощи комплекса программ SMCS для обработки спутниковых данных [20].

2.2. Расчет ЭОФ

Для расчета ЭОФ использовался стандартный алгоритм построения ковариационной матрицы и нахождения её собственных векторов [8]. Для всего массива спектров яркости моря рассчитывался средний спектр $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ (рис. 1), затем его величина вычиталась из каждого измеренного спектра, а полученный массив использовался для расчета ковариационной матрицы, нахождения собственных векторов ψ_i ковариационной матрицы и собственных чисел b_i . При этом собственные числа располагались в порядке убывания, а соответствующие им собственные вектора в порядке уменьшения их дисперсии. Использование полученных собственных векторов ψ_i в качестве базиса является оптимальным с точки зрения минимума среднеквадратичной ошибки [8], достаточно нескольких первых собственных векторов, чтобы объяснить

большую часть изменчивости измеренных спектров $R_{rs}(\lambda)$. В данной работе были использованы пять первых собственных векторов, таким образом, получалась следующая формула аппроксимации измеренных спектров:

$$R_{rs}(\lambda) = \langle R_{rs}(\lambda) \rangle + \sum_{i=1}^5 C_i \psi_i, \quad (1)$$

где C_i — коэффициенты разложения, которые находятся методом наименьших квадратов.

С целью использования ЭОФ для спутниковых данных исходный массив гиперспектральных $R_{rs}(\lambda)$ в диапазоне 400–700 нм с разрешением 2 нм при помощи интерполяции был пересчитан для спектральных каналов сканеров цвета MODIS и OLCI. Для полученных массивов были рассчитаны соответствующие ЭОФ. На рис. 2, а–в показаны графики среднего спектра $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ и трех первых ЭОФ, как в случае использования исходного массива гиперспектральных $R_{rs}(\lambda)$, так и для пересчитанных для каналов MODIS

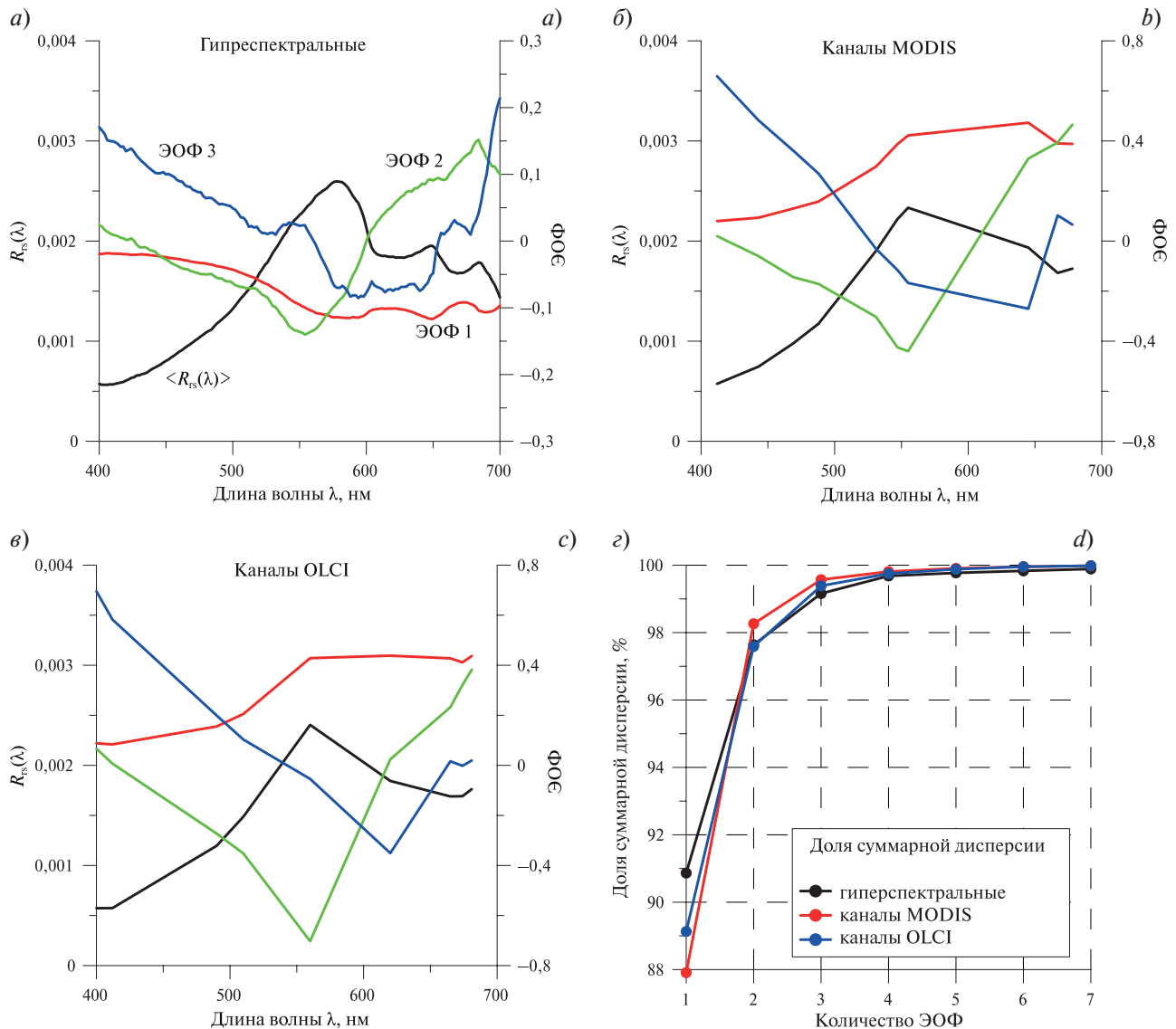


Рис. 2. Первые три ЭОФ (первая ЭОФ — красная линия, вторая — зеленая, третья — синяя; правая вертикальная шкала) и средний спектр $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ (черная линия, левая вертикальная шкала) в случае использования гиперспектральных данных (а), спектральных каналов MODIS (б) и OLCI (в); и доля суммарной дисперсии в зависимости от количества ЭОФ (г)

Fig. 2. The first three EOFs (the first EOF is red line, the second is green, the third is blue; right vertical scale) and the average spectrum $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ (black line, left vertical scale) in case of using hyperspectral data (a), spectral channels of MODIS (b) and OLCI (c); and the fraction of the total variance depending on the amount of EOF (d)

и OLCI. Видно, что ЭОФ для спутниковых каналов, из-за существенного уменьшения их количества, теряют часть спектральных особенностей, которые заметны в случае использования гиперспектральных данных, но в целом спектральный ход $\langle R_{rs}(\lambda) \rangle$ и первых ЭОФ для случая спутниковых каналов и гиперспектральных данных схожи. На рис. 2, з представлен график зависимости доли суммарной дисперсии от количества ЭОФ. Видно, что даже использование 3-х первых ЭОФ позволяет учитывать более 99 % дисперсии, даже в случае использования ограниченного количества спутниковых каналов, использование же пяти первых ЭОФ позволяет учитывать практически 100 % суммарной дисперсии ковариационной матрицы.

2.3. Алгоритмы оценки биооптических характеристик

Для оценки трех биооптических характеристик (концентраций *Chl* и *TSM*, биомассы цианобактерий) было получено уравнение регрессии между величинами данных характеристик и коэффициентами разложения C_i по пяти первым ЭОФ, рассчитанными для каждого измеренного спектра яркости моря $R_{rs}(\lambda)$. Например, в случае концентрации взвеси и использования ЭОФ для спектральных каналов MODIS уравнение имеет вид:

$$TSM_MODIS10 = 2,44 + 463 C_1^{10} + 30,2 C_2^{10} - 924 C_3^{10} + 84,2 C_4^{10} + 717 C_5^{10}. \quad (2)$$

При выведении формулы (2) и аналогичных ей для других биооптических характеристик использовались величины C_i^{10} , полученные для каждого измеренного спектра яркости моря $R_{rs}(\lambda)$ с использованием всех 10 видимых каналов MODIS (412, 443, 469, 488, 531, 547, 555, 645, 667, 678 нм).

Известно, что спутниковые оценки спектра яркости моря подвержены ошибкам атмосферной коррекции [5, 21, 22]. Было показано, что практически для всех современных алгоритмов атмосферной коррекции наибольшие ошибки для величины $R_{rs}(\lambda)$ по спутниковым данным характерны для коротковолновых каналов [21]. Для 10 станций в Финском заливе, где были выполнены подспутниковые измерения $R_{rs}(\lambda)$ (см. раздел 2.1), наибольшие средние ошибки атмосферной коррекции 83 и 38 % были получены для каналов MODIS 412 и 443 нм, соответственно. Для остальных каналов средние ошибки варьировали от 6 до 33 %. Чтобы понять, можно ли не использовать коротковолновые каналы при расчете коэффициентов разложения C_i , в случае ЭОФ для каналов MODIS, были проведены вычисления C_i не только по всем 10 видимым каналам, но и без использования нескольких первых каналов. А именно для оставшихся семи или шести каналов в диапазоне 488–678 или 531–678 нм, соответственно. Будем обозначать соответствующие величины коэффициентов разложения как C_i^7 и C_i^6 . В табл. 1 приведены коэффициенты регрессии K_i для оценки концентраций *Chl* и *TSM*, в случае использования C_i^{10} и C_i^7 . Биооптические параметры, рассчитанные с помощью соответствующих коэффициентов регрессии K_i , маркируются как MODIS10 и MODIS7. Видно, что влияние уменьшения количества спектральных каналов, используемых для расчета коэффициентов разложения по ЭОФ, на коэффициенты регрессии K_i зависит от продукта и порядкового номера коэффициента K . В случае *Chl* и *TSM* мало изменяются K_0 и K_1 , а вот коэффициенты более высокого порядка могут как изменяться на порядок (K_5 для *Chl*), так и практически не меняться (K_4 для *Chl*).

Для оценки точности полученных алгоритмов, рассчитывались среднеквадратичная S_{sq} и относительная S_r ошибки для рассчитанных модельных величин биооптических характеристик относительно измеренных.

Таблица 1

Table 1

Коэффициенты формул регрессии для расчета *Chl* и *TSM*, полученные в результате использования различных коэффициентов разложения по базису ЭОФ. Для продуктов маркированных MODIS10 использовались C_i^{10} , MODIS7 — C_i^7

Coefficients of the regression formulas for calculating *Chl* and *TSM*, which were obtained as a result of using various expansion coefficients according to the EOF basis. For products labeled MODIS10, C_i^{10} was used, MODIS7 — C_i^7

Продукт	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
Chl_MODIS10	4,76	1494	-598	-3106	10252	16361
Chl_MODIS7	5,33	1738	-216	-723	10226	1672
TSM_MODIS10	2,44	463	30,2	-924	84,2	717
TSM_MODIS7	2,47	471	58,2	-1042	353	321

3. Результаты и обсуждение

3.1. Валидация по натурным спектрам

Прежде всего была выполнена проверка работоспособности и точности полученных алгоритмов при использовании спектров яркости моря $R_{rs}(\lambda)$, измеренных *in situ*. На рис. 3. показано соответствие между измеренными и рассчитанными величинами всех рассматриваемых биооптических характеристик в случае использования ЭОФ для гиперспектральных R_{rs} и всех видимых каналов MODIS. Для каналов OLCI графики не представлены, так как они аналогичны полученным для MODIS. В табл. 2 представлены статистические параметры соответствия для всех трех вариантов ЭОФ во всем видимом диапазоне, для сравнения приведены данные для регрессионных алгоритмов [5, 6].

Как видно из рис. 3 и табл. 2, все три рассматриваемые биооптические характеристики, рассчитанные с помощью гиперспектральных ЭОФ хорошо соответствуют измеренным величинам. В случае *Chl* и *TSM* коэффициент детерминации R^2 равен 0,66 и 0,67, соответственно, а относительные ошибки S_r равны 37 и 18%, что даже лучше, чем при использовании регрессионных алгоритмов [5]. В случае *Bcyan* величина коэффициента детерминации меньше ($R^2=0,50$), а $S_r=109\%$, но это сопоставимо с $R^2=0,61$ и $S_r=84\%$ для регрессионного алгоритма [6]. При использовании ЭОФ спутниковых сканеров цвета для оценки концентраций *Chl* и *TSM* параметры соответствия между измеренными и модельными значениями меняются незначительно, а вот для оценки *Bcyan* методика применения ЭОФ оказалась неприменима: $R^2 < 0,2$, а значительные относительные ошибки увеличиваются ещё вдвое. Поэтому все дальнейшие наши исследования были ограничены только алгоритмами для *Chl* и *TSM*.

Так как во время проведения экспедиций в 2012–2014 гг. были доступны только данные MODIS и только для каналов этого сканера разработаны региональные алгоритмы для акватории Финского залива, то в заключительной части статьи представлены результаты расчетов с использованием ЭОФ для спектральных каналов MODIS. В табл. 3 можно увидеть, как изменятся параметры соответствия измеренных и рассчитанных величин *Chl* и *TSM*, если, во-первых, для расчета коэффициентов разложения по ЭОФ использовать сокращенное количество каналов (C_1^7 или C_1^6), во-вторых, использовать другие коэффициенты регрессии (продукты MODIS7 вместо MODIS10, см. табл. 1). То есть, например, в случае расчета *TSM* для варианта MODIS10/ C_1^7 используется формула (2), в которой используются коэффициенты регрессии K_i для MODIS10, а коэффициенты разложения C_1^7 получены при аппроксимации спектров $R_{rs}(\lambda)$ в диапазоне 488–678 нм (для 7 спектральных каналов).

Как видно из табл. 3, в случае использования натуральных спектров R_{rs} исключение коротковолновых каналов практически никак не сказывается на параметрах соответствия для концентрации взвеси. Для концентрации *Chl* изменения есть, но они не велики: при использовании C_1^6 соответствие практически не изменяется, а для C_1^7 — немного ухудшается. Но надо помнить, что все эти результаты получены для натуральных спектров R_{rs} , не подверженных ошибкам атмосферной коррекции. Если же использовать коэффициенты регрессии, соответствующие MODIS7 вместо MODIS10, то в случае *TSM* опять нет каких-либо заметных изменений, а для *Chl* наблюдается заметное уменьшение средней абсолютной ошибки одновременно с уменьшением коэффициента детерминации. Это связано с тем, что в этом случае для одной станции из 40 была получена отрицательная оценка *Chl*, ещё для одной очень низкая оценка ($0,03 \text{ мг м}^{-3}$), в то время как по данным измерений концентрация *Chl* на этих станциях была равна $1,7 \text{ мг м}^{-3}$, что и привело к заметному уменьшению коэффициенту детерминации. Если же эти станции не учитывать, то $R^2=0,55$. Таким образом, расчеты с сокращенным количеством каналов MODIS по натурным спектрам R_{rs} показали, что концентрация *Chl*, более чувствительна к таким изменениям, чем концентрация *TSM*, и что при использовании ЭОФ даже при отсутствии ошибок атмосферной коррекции всегда есть вероятность получить отрицательные или нереально низкие оценки биооптических параметров.

3.2. Валидация по данным MODIS

Также в таблице 3 представлены результаты оценки соответствия измеренных и рассчитанных величин *Chl* и *TSM* полученные при использовании 10 спутниковых спектров, для которых есть подспутниковые измерения и которые ранее использовались для валидации регрессионных алгоритмов [5].

Как видно из табл. 3, при использовании спутниковых данных для оценки концентрации взвеси наилучшие результаты получаются при использовании C_1^7 не зависимо от коэффициентов регрессии (MODIS10 или MODIS7) — наименьшие ошибки и наибольшие величины коэффициента детерминации. Наибольшие ошибки получаются при использовании C_1^6 . Расчет по регрессионному алгоритму [5] дает близкие оценки: $S_{sq}=0,64 \text{ мг л}^{-1}$, $R^2=0,61$.

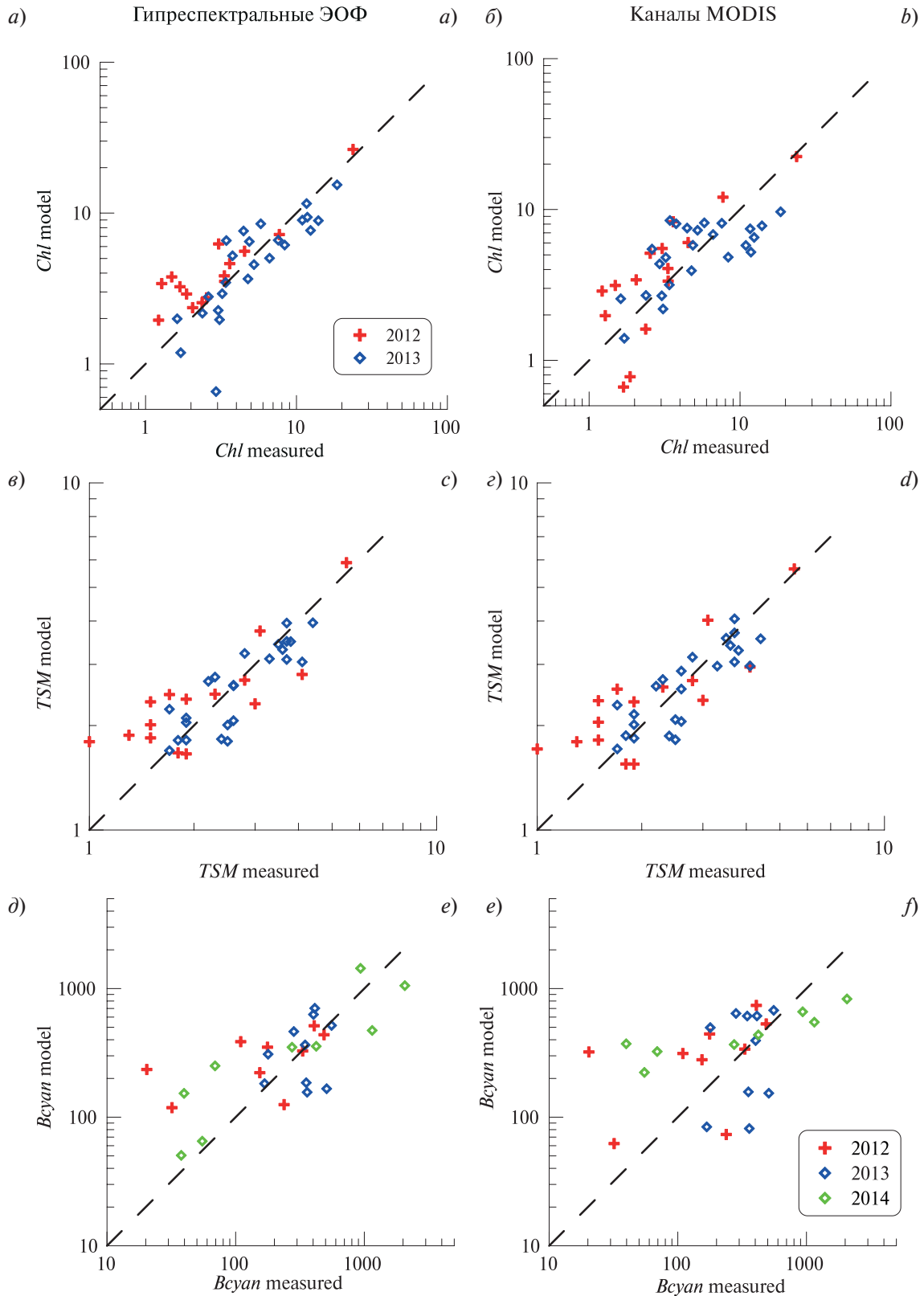


Рис. 3. Сопоставление величин *Chl* (a, б), *TSM* (в, г) и *Bcyan* (д, е) измеренных (measured) и рассчитанных (model) с использованием ЭОФ. Слева (a, в, д) использовались гиперспектральные ЭОФ, справа (б, г, е) — для 10 спектральных каналов MODIS. Пунктирная линия показывает идеальное соответствие 1:1

Fig. 3. Comparison of *Chl* (a, b), *TSM* (c, d) and *Bcyan* (e, f) values which were measured (measured) and calculated (model) using EOF. On the left hyperspectral EOF were used, on the right — 10 MODIS spectral channels. The dotted line shows a perfect fit 1:1

Таблица 2
 Table 2

Параметры соответствия между измеренными и рассчитанными величинами *Chl*, *TSM* и *Bcyan* в зависимости от используемого алгоритма. Для каждого продукта в скобках указано использованное количество станций

Correspondence parameters between the measured and calculated values of *Chl*, *TSM* and *Bcyan* depending on the algorithm used. For each product, the number of stations is indicated in brackets

Алгоритм	Коэффициент детерминации R^2	Среднеквадратичная ошибка S_{sq}	Относительная ошибка S_r
Концентрация хлорофилла <i>Chl</i> , $mg\ m^{-3}$ (N = 40)			
ЭОФ, гиперспектральные	0,66	1,94	37 %
ЭОФ, MODIS	0,54	3,16	52 %
ЭОФ, OLCI	0,65	2,52	45 %
Регрессионный алгоритм	0,57	3,37	56 %
Концентрация взвеси <i>TSM</i> , $mg\ l^{-1}$ (N = 39)			
ЭОФ, гиперспектральные	0,67	0,51	18 %
ЭОФ, MODIS	0,66	0,53	19 %
ЭОФ, OLCI	0,70	0,48	17 %
Регрессионный алгоритм	0,61	0,62	21 %
Биомасса цианобактерий <i>Bcyan</i> , $mg\ m^{-3}$ (N = 28)			
ЭОФ, гиперспектральные	0,50	290	109 %
ЭОФ, MODIS	0,17	338	184 %
ЭОФ, OLCI	0,09	346	198 %
Регрессионный алгоритм	0,61	272	84 %

Таблица 3
 Table 3

Параметры соответствия между измеренными и рассчитанными величинами *Chl* и *TSM* в зависимости от используемого алгоритма и входных данных

Correspondence parameters between the measured and calculated values of *Chl* and *TSM* depending on the algorithm and input data

Алгоритм/коэффициенты C_i	Натурные спектры			Спектры MODIS		
	R^2	S_{sq}	S_r	R^2	S_{sq}	S_r
Концентрация хлорофилла <i>Chl</i> , $mg\ m^{-3}$						
MODIS10/ C_i^{10}	0,54	3,16	52 %	0,22	3,22	63 %
MODIS10/ C_i^7	0,50	3,32	53 %	0,35	3,10	66 %
MODIS10/ C_i^6	0,53	3,19	50 %	0,05	4,44	63 %
MODIS7/ C_i^7	0,39	2,96	53 %	0,52	2,95	51 %
Концентрация взвеси <i>TSM</i> , $mg\ l^{-1}$						
MODIS10/ C_i^{10}	0,66	0,53	19 %	0,77	0,48	20 %
MODIS10/ C_i^7	0,69	0,51	18 %	0,87	0,44	18 %
MODIS10/ C_i^6	0,70	0,52	18 %	0,81	0,97	27 %
MODIS7/ C_i^7	0,68	0,51	18 %	0,85	0,43	18 %

Соответствие измеренных и рассчитанных по данным MODIS величин *Chl* заметно хуже. Только при использовании C_i^7 получаются оценки близкие к полученным при расчетах по натурным спектрам. Стоит отметить, что валидация регрессионного алгоритма оценки *Chl* [5] по спутниковым данным дала даже худшие результаты: $S_{sq} = 3,88\ mg\ m^{-3}$, $R^2 = 0,12$.

Таким образом, валидация по данным MODIS показала, что алгоритмы для оценки *Chl* и *TSM* с использованием ЭОФ, дают результаты не хуже чем регрессионные [5] и лучше всего при этом использовать C_i^7 или C_i^{10} . Исключение четырех коротковолновых каналов (412–488 нм) заметно ухудшает соответствие измеренным значениям. Но надо помнить, что валидация по спутниковым данным была выполнена всего лишь для 10 станций.

3.3. Пример распределений по данным MODIS

На рис. 4 показан пример распределений концентрации *Chl* и взвеси *TSM*, рассчитанных по данным MODIS-Aqua от 22 июля 2012 г. Расчет проводился как по регрессионным алгоритмам [5], так и с использованием ЭОФ (коэффициенты регрессии K_i для MODIS10 и коэффициенты разложения по базису ЭОФ для 10 каналов — C_i^{10}). В целом карты не показывают принципиальной разницы между величинами биооптических параметров, посчитанными разными алгоритмами. Есть небольшие различия в области низких значений *Chl* в северо-восточной части залива и высоких величин *TSM* вблизи берега.

Большую часть исследуемой акватории занимают воды с концентрацией хлорофилла 2–8 мг м⁻³ и взвеси 1–4 мг л⁻¹, наиболее высокие концентрации хлорофилла наблюдаются в восточной части акватории у Невской губы и вдоль южного берега Финского залива. Видно общее сходство распределений взвеси и хлорофилла. Подобное сходство вполне ожидаемо, так как существует общий фактор, определяющий распространение взвеси и хлорофилла — река Нева приносит взвешенные частицы, в том числе фитопланктон, содержащий хлорофилл, и биогены для создания первичной продукции.

Для большей наглядности различий результатов алгоритмов были построены графики с попиксельным сопоставлением оценок, полученных регрессионными и новыми ЭОФ алгоритмами (рис. 5). Для обоих продуктов наблюдается хорошая корреляция: коэффициент детерминации R^2 равен 0,70 и 0,78 для *Chl* и *TSM* соответственно. Есть заметное смещение оценок: в случае *Chl* регрессионный алгоритм дает более высокие оценки в среднем на 0,6 мг м⁻³ (12–14% от средней по региону величины), в случае *TSM* завышение ещё более заметное 0,9 мг л⁻¹ или 25–34% от средней по региону оценки. Наибольшее различие между алгоритмами наблюдается в областях низких значений *Chl* (< 2 мг м⁻³) и высоких значений *TSM* (> 6 мг л⁻¹). Надо заметить, что обе эти области относятся к тем, где практически не было натуральных измерений. По данным прямых измерений минимальное значение *Chl* = 1,2 мг м⁻³, максимальная величина *TSM* = 5,5 мг л⁻¹.

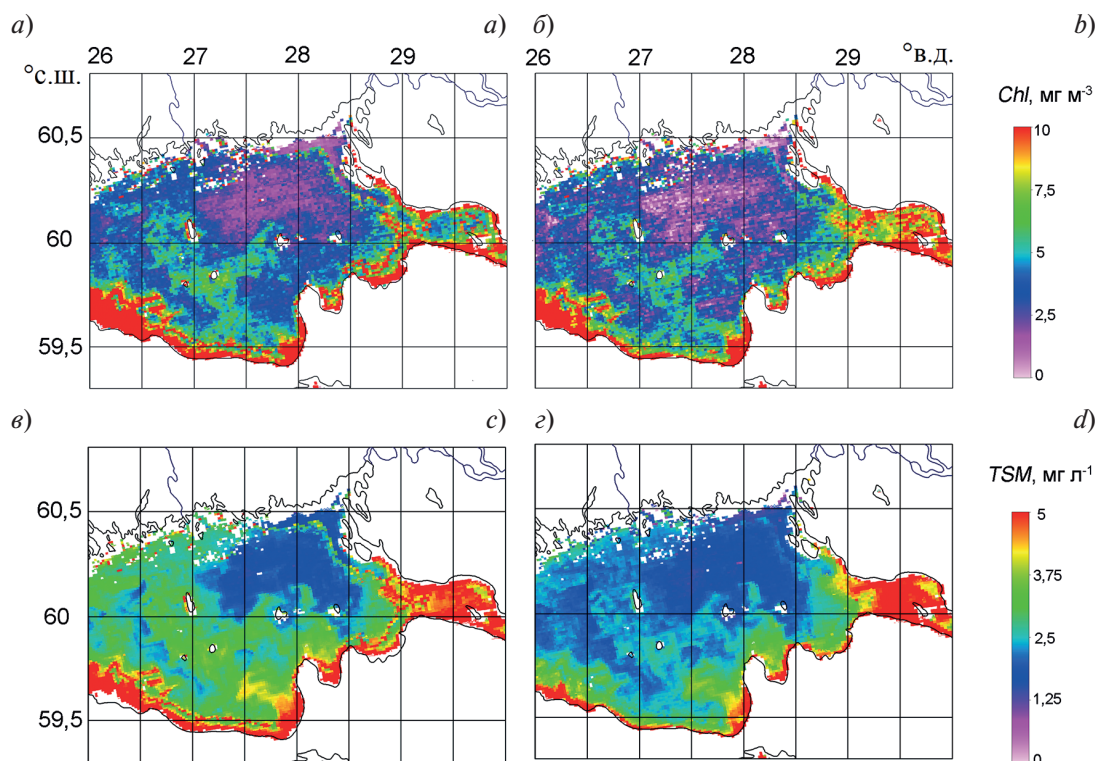


Рис. 4. Пространственные распределения концентрации *Chl* (а, б) и *TSM* (в, г), рассчитанные по данным MODIS-Aqua от 22 июля 2012 г. Слева (а, в) расчет проводился по регрессионным алгоритмам [5], справа (б, г) с использованием ЭОФ

Fig. 4. Spatial distributions of *Chl* (a, b) and *TSM* (c, d) concentration, which were calculated according to MODIS-Aqua data from July 22, 2012. On the left the calculation was carried out according to regression algorithms [2], on the right — using EOF

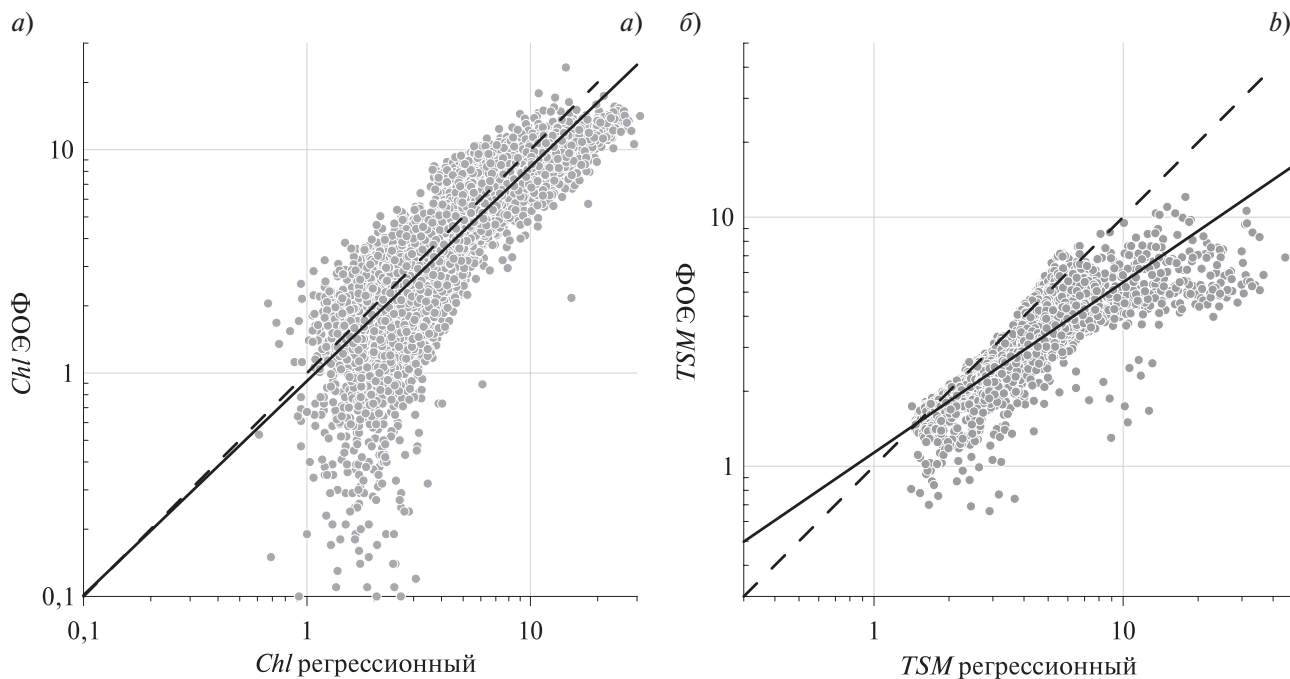


Рис. 5. Попиксельное сопоставление величин концентраций хлорофилла *Chl* (а) и взвеси *TSM* (б), рассчитанных алгоритмами [5] и с использованием ЭОФ по данным MODIS-Aqua от 22 июля 2012 г. для восточной части Финского залива (рис. 4). Пунктирная линия показывает идеальное соответствие 1:1, сплошная — линейную регрессию в логарифмическом масштабе

Fig. 5. Pixel-by-pixel comparison of chlorophyll *Chl* (a) and particulate matter *TSM* (b) concentration values, which were calculated by regression [2] and EOF algorithms according to MODIS-Aqua data from July 22, 2012 for the eastern part of the Gulf of Finland (Fig. 4). The dotted line shows a perfect fit 1:1, the solid line shows a linear regression on a logarithmic scale

Для уточнения алгоритмов и их валидации необходим более обширный массив данных натуральных измерений. Для алгоритмов с использованием ЭОФ в случае концентрации взвеси практически не наблюдалось отрицательных значений ($< 0,03\%$), для концентрации *Chl* доля отрицательных величин составила $0,7\%$.

4. Заключение

Массив данных натуральных измерений коэффициента яркости водной толщи $\rho(\lambda)$, проведенных одновременно с определением *Chl*, *TSM*, *Vcyan* в поверхностном слое воды, позволил исследовать возможность использования эмпирических ортогональных функций для разработки алгоритмов оценки биооптических характеристик воды. Оказалось, что в случае концентрации хлорофилла-*a* и взвеси, такие алгоритмы можно создать не только для гиперспектральных коэффициентов яркости моря $R_{rs}(\lambda)$, но для данных спутниковых сканеров цвета MODIS и OLCI. При этом ЭОФ алгоритмы для спутниковых каналов дают результаты не хуже, чем регрессионные [5], а для гиперспектральных ЭОФ даже лучше. То есть использование ЭОФ подхода для создания биооптических алгоритмов наиболее целесообразно при наличии гиперспектральных оптических данных. Для оценки биомассы цианобактерий методика применения ЭОФ в случае использования спутниковых каналов для современных сканеров цвета неприменима. Возможно, для *Vcyan* необходимо подобрать специальную комбинацию ЭОФ, как это было сделано для определения концентрации фикоцианина [14].

Так как спутниковые спектры яркости моря подвержены ошибкам атмосферной коррекции особенно значимым для коротковолновых каналов [21], было проведено исследование возможности исключения коротковолновых каналов MODIS в диапазонах 412–488 и 412–531 нм. Показано, что концентрация *Chl*, более чувствительна к таким изменениям, чем концентрация *TSM*. Валидация по данным MODIS показала, что алгоритмы для оценки *Chl* и *TSM* с использованием ЭОФ, дают результаты не хуже, чем регрессионные [5] и лучше всего при этом использовать коэффициенты разложения C_1^7 или C_1^{10} . Исключение четырех коротковолновых каналов (412–488 нм) заметно ухудшает соответствие между модельными и измеренными значениями. Но из-за плохих погодных условий валидация по спутниковым данным была выполнена всего лишь для 10-ти станций.

Тестовый расчет распределений концентрации *Chl* и взвеси *TSM* по данным MODIS-Aqua за 22 июля 2012 г. разными алгоритмами показал, что для обоих продуктов наблюдается хорошая корреляция: коэффициент детерминации R^2 равен 0,70 и 0,78 для *Chl* и *TSM* соответственно. Есть заметное смещение оценок: в случае *Chl* регрессионный алгоритм дает более высокие оценки в среднем на $0,6 \text{ мг м}^{-3}$ (12–14% от средней по региону величины), в случае *TSM* завышение ещё более заметное $0,9 \text{ мг л}^{-1}$ или 25–34% от средней по региону оценки. Наиболее заметное различие между алгоритмами наблюдается в областях низких величин *Chl* ($< 2 \text{ мг м}^{-3}$) и высоких значений *TSM* ($> 6 \text{ мг л}^{-1}$). Обе эти области относятся к тем, где практически не было натуральных измерений. Следовательно, нет возможности, выяснить какой алгоритм даёт более достоверные оценки в этих областях. Для валидации алгоритмов и их возможной модификации необходим более обширный массив данных натуральных измерений.

Благодарности

Авторы благодарят А.Н. Храпко, В.Р. Таскаева, Е.К. Ланге, Т.Р. Еремину за предоставленные результаты измерений, также анонимных рецензентов за внимательное прочтение текста статьи и полезные замечания.

Финансирование

Сопоставление данных судовых и спутниковых измерений выполнено в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0128-2021-0001), разработка алгоритмов для определения биооптических характеристик морской воды с использованием эмпирических ортогональных функции проведена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-10059). Грант предоставлен через Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Funding

Comparison of shipborne and satellite measurements was carried out within the framework of the state task of the IO RAS (theme No. 0128-2021-0001), the development of algorithms for determining the biooptical characteristics of sea water using empirical orthogonal functions was carried out with the support of a grant from the Russian Science Foundation (theme No. 21-77-10059). The grant was provided through the Institute of Oceanology. P.P. Shirshov RAS.

Литература

1. Еришова А.А., Коробченкова К.Д., Агранова Ю.С. Оценка состояния Финского залива по индикаторам эвтрофирования ХЕЛКОМ // Ученые записки РГГМУ. 2018. № 51. С. 137–149.
2. Кочеткова Е.С., Исаев А.В., Еремина Т.Р. Валидация регионального алгоритма для определения концентрации хлорофилла а в восточной части Финского залива по данным спутниковых измерений // Ученые записки РГГМУ. 2017. № 47. С. 43–48.
3. Kaupilla P., Eremina T., Ershova A., Maximov A., Lips I., Lips U., Alasalmi H., Anttila S., Attila J., Bruun J., Kaitala S., Kallio K., Keto V., Kuosa H., Pitkänen H., Lange E. Chlorophyll a and phytoplankton blooms // The Gulf of Finland assessment. Reports of the Finnish Environment Institute. SYKE, 2016. N 27. P. 114–123.
4. Максимов А.А., Еремина Т.Р., Ланге Е.К., Литвинчук Л.Ф., Максимова О.Б. Режимная перестройка экосистемы восточной части Финского залива вследствие инвазии полихет *Marenzelleria arctica* // Океанология. 2014. Т. 54, № 1. С. 52–59. doi:10.7868/S0030157413060063
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. Vol. 56, № 4. P. 737–756. doi:10.5697/oc.56-4.737
6. Вазюля С.В., Копелевич О.В., Кочеткова Е.С., Ланге Е.К., Шеберстов С.В., Еремина Т.Р., Храпко А.Н. Региональные алгоритмы количественной оценки цветений цианобактерий в восточной части Финского залива по данным спутниковых сканеров цвета // Тезисы Четырнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. 230 с.
7. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. / Под ред. О.В. Копелевича. М.: ИО РАН, 2018. 140 с. https://optics.ocean.ru/Atlas_2019/8_Monography_2018.pdf (дата обращения: 10.02.2022).
8. Обухов А.М. О статистически ортогональных разложениях эмпирических функций // Известия академии наук СССР. Серия геофизика. 1960. № 3. С. 432–439.

9. Barnes B.B., Hu C., Cannizzaro J.P., Craig S.E., Hallock P., Jones D.L., Lehrter J.C., Melo N., Schaeffer B.A., Zepp R. Estimation of diffuse attenuation of ultraviolet light in optically shallow Florida Keys waters from MODIS measurements // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 519–532. doi:10.1016/j.rse.2013.09.024
10. Craig S.E., Jones C.T., Li W.K.W., Lazin G., Horne E., Caverhill C. Deriving optical metrics of coastal phytoplankton biomass from ocean colour // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 119. P. 72–83. doi:10.1016/j.rse.2011.12.007
11. Qi L., Hu C., Duan H., Barnes B.B., Ma R. An EOF-based algorithm to estimate chlorophyll a concentrations in Taihu lake from MODIS land-band measurements: implications for near real-time applications and forecasting models // Remote Sensing. 2014. Vol. 6. P. 10694–10715. doi:10.3390/rs61110694
12. Моусеенко Г.С., Левашов С.Д. Применение эмпирических ортогональных функций при спутниковом мониторинге верхнего слоя морской воды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 1. С. 42–49. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-1-42-49
13. Wozniak M., Bradtke K., Darecki M., Krezel A. Empirical model for phycocyanin concentration estimation as an indicator of cyanobacterial bloom in the optically complex coastal waters of the Baltic Sea // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, N 3. 212. doi:10.3390/rs8030212
14. Soja-Wozniak M., Craig S.E., Kratzer S., Wojtasiewicz B., Darecki M., Jones C.T. A novel statistical approach for ocean colour estimation of inherent optical properties and cyanobacteria abundance in optically complex waters // Remote Sensing. 2017. Vol. 9, N4. P. 343–365. doi:10.3390/rs9040343
15. Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semi-analytical model // Applied Optics. 1998. Vol. 37. P. 6329–6338.
16. Артемьев В.А., Буренков В.И., Вортман М.И., Григорьев А.В., Копелевич О.В., Храпко А.Н. Подспутниковые измерения цвета океана: новый плавающий спектрорадиометр и его метрология // Океанология. 2000. Т. 40, № 1. С. 148–155.
17. Lange E. Plankton algae in ecological mapping of the Gulf of Finland // Baltic Floating University Research Bulletin. UNESCO, 2008. N 10. P. 28–32.
18. Ланге Е.К., Еремина Т.Р., Еришова А.А., Исаев А.В. Влияние термогалинного режима на структуру позднелетнего фитопланктона восточной части Финского залива Балтийского моря // Морские биологические исследования: достижения и перспективы. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, приуроченной к 145-летию Севастопольской биологической станции. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2016. Т. 2. С. 335–338.
19. Holm-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W., Strickland J.D.H. Fluorometric determination of chlorophyll // Journal du Conseil — Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer. 1965. Vol. 30. P. 3–15.
20. Шеберстов С.В. Система пакетной обработки океанологических спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 6. С. 154–161.
21. Mognane M.A., Jamet C., Loisel H., Vantrepotte V., Mériaux X., Cauvin A. Evaluation of Five Atmospheric Correction Algorithms over French Optically-Complex Waters for the Sentinel-3A OLCI Ocean Color Sensor // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. 668. doi:10.3390/rs11060668
22. Glukhovets D., Kopelevich O., Yushmanova A., Vazyulya S., Sheberstov S., Karalli P., Sahling I. Evaluation of the CDOM Absorption Coefficient in the Arctic Seas Based on Sentinel-3 OLCI Data // Remote Sensing. 2020. Vol. 12, N 19. 3210. doi:10.3390/rs12193210

References

1. Ershova A.A., Korobchenkova K.D., Agranova Ju.S. Assessment of the state of the Gulf of Finland based on HELCOM indicators of eutrophication. *Uchenye Zapiski RGGMU*. 2018, 51, 137–149 (in Russian).
2. Kochetkova E.S., Isaev A.V., Eremina T.R. Validation of a regional algorithm for the chlorophyll a concentration determination in the eastern part of the Gulf of Finland with satellite measurements. *Uchenye Zapiski RGGMU*. 2017, 47, 43–48 (in Russian).
3. Kauppila P., Eremina T., Ershova A., Maximov A., Lips I., Lips U., Alasalmi H., Anttila S., Attila J., Bruun J., Kaitala S., Kallio K., Keto V., Kuosa H., Pitkänen H., Lange E. Chlorophyll a and phytoplankton blooms. *The Gulf of Finland assessment. Reports of the Finnish Environment Institute. SYKE*. 2016, 27, 114–123.
4. Maximov A.A., Eremina T.R., Lange E.K., Litvinchuk L.F., Maximova O.B. Regime shift in the ecosystem of the eastern Gulf of Finland caused by the invasion of the polychaete *Marenzelleria arctica*. *Oceanology*. 2014, 54(1), 46–53. doi:10.1134/S0001437013060052
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, 56(4), 737–756. doi:10.5697/oc.56-4.737

6. Vazyulya S.V., Kopelevich O.V., Kochetkova E.S., Lange E.K., Sheberstov S.V., Eremina T.R., Khrapko A.N. Regional algorithms for quantifying cyanobacteria blooms in the eastern part of the Gulf of Finland based on satellite color scanner data. *Abstracts of 14th All-Russian Open Conference "Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*. Moscow, IKI, 2016, 230 (in Russian).
7. Kopelevich O.V., Saling I.V., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Karalli P.G., Yushmanova A.V. Biooptical characteristics of the seas washing the shores of the western half of Russia, according to satellite color scanners 1998–2017 / Ed. by O.V. Kopelevich. Moscow, SIO RAS, 2018. 140 p. https://optics.ocean.ru/Atlas_2019/8_Monography_2018.pdf (access date: 10.02.2022) (In Russian).
8. Obukhov A.M. On statistically orthogonal expansions of empirical functions. *Izvestiya AN SSSR, Ser. geofizicheskaya*, 1960, 3, 432–439 (in Russian).
9. Barnes B.B., Hu C., Cannizzaro J.P., Craig S.E., Hallock P., Jones D.L., Lehrter J.C., Melo N., Schaeffer B.A., Zepp R. Estimation of diffuse attenuation of ultraviolet light in optically shallow Florida Keys waters from MODIS measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2014, 140, 519–532. doi:10.1016/j.rse.2013.09.024
10. Craig S.E., Jones C.T., Li W.K.W., Lazin G., Horne E., Caverhill C. Deriving optical metrics of coastal phytoplankton biomass from ocean colour. *Remote Sensing of Environment*. 2012, 119, 72–83. doi:10.1016/j.rse.2011.12.007
11. Qi L., Hu C., Duan H., Barnes B.B., Ma R. An EOF-based algorithm to estimate chlorophyll a concentrations in Taihu lake from MODIS land-band measurements: implications for near real-time applications and forecasting models. *Remote Sensing*. 2014, 6, 10694–10715. doi:10.3390/rs61110694
12. Moiseenko G.S., Levashov S.D. Application of empirical orthogonal functions in satellite monitoring of the upper layer of sea water. *Sovremennye Problemy Distancionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*. 2020, 17, 1, 42–49 (in Russian). doi:10.21046/2070-7401-2020-17-1-42-49
13. Wozniak M., Bradtke K., Darecki M., Krezel A. Empirical model for phycocyanin concentration estimation as an indicator of cyanobacterial bloom in the optically complex coastal waters of the Baltic Sea. *Remote Sensing*. 2016, 8(3), 212. doi:10.3390/rs8030212
14. Soja-Wozniak M., Craig S.E., Kratzer S., Wojtasiewicz B., Darecki M., Jones C.T. A novel statistical approach for ocean colour estimation of inherent optical properties and cyanobacteria abundance in optically complex waters. *Remote Sensing*. 2017, 9(4), 343–365. doi:10.3390/rs9040343
15. Lee Z., Carder K.L., Mobley C.D., Steward R.G., Patch J.S. Hyperspectral remote sensing for shallow waters. I. A semi-analytical model. *Applied Optics*. 1998, 37, 6329–6338.
16. Artemiev V.A., Burenkov V.I., Vortman M.I., Grigoriev A.V., Kopelevich O.V., Khrapko A.N. Sea-truth measurements of ocean color: a new floating spectroradiometer and its metrology. *Oceanology*. 2000, 40(1), 139–145.
17. Lange E. Plankton algae in ecological mapping of the Gulf of Finland. *Baltic Floating University Research Bulletin*. UNESCO, 2008, 10, 28–32.
18. Lange E.K., Eremina T.R., Ershova A.A., Isaev A.V. Influence of thermohaline regime at late summer phytoplankton structure in the Eastern Gulf of Finland (Baltic Sea). *Morskiye biologicheskiye issledovaniya: dostizheniya i perspektivy. Proceedings of All-Russian conference with international participation devoted to 145-anniversary of Sevastopol biological station. Sevastopol', EKOSI-Gidrofizika*, 2016, 2, 335–338 (in Russian).
19. Holm-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W., Strickland J.D.H. Fluorometric determination of chlorophyll. *Journal du Conseil — Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer*. 1965, 30, 3–15.
20. Sheberstov S.V. System for batch processing of oceanographic satellite data. *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, 12, 6, 154–161 (In Russian).
21. Mograne M.A., Jamet C., Loisel H., Vantrepotte V., Mériaux X., Cauvin A. Evaluation of Five Atmospheric Correction Algorithms over French Optically-Complex Waters for the Sentinel-3A OLCI Ocean Color Sensor. *Remote Sensing*. 2019, 11, 668. doi:10.3390/rs11060668
22. Glukhovets D., Kopelevich O., Yushmanova A., Vazyulya S., Sheberstov S., Karalli P., Sahling I. Evaluation of the CDOM Absorption Coefficient in the Arctic Seas Based on Sentinel-3 OLCI Data. *Remote Sensing*. 2020, 12(19), 3210. doi:10.3390/rs12193210

Об авторах

ВАЗЮЛЯ Светлана Васильевна

Старший научный сотрудник лаборатории оптики океана, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60

ORCID ID: 0000-0001-7792-8489
e-mail: svershova@mail.ru

ШЕБЕРСТОВ

Сергей Валентинович

Старший научный сотрудник лаборатории оптики океана, Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), ROR 00n1e1p60

ORCID ID: 0000-0001-8489-2859
e-mail: sheberst@yandex.ru