

УДК 519.9

Свёрточно-параметрический метод измерения концентрации хлорофилла *a* в морской воде

© 2016. Ф. Г. Агаев, д. т. н., профессор, М. М. Байрамова, диссертант, Национальное аэрокосмическое агентство, Азербайджан, г. Баку, AZ 1106, ул. С. С. Ахундова, 1, e-mail: bayramovamm@rambler.ru

Критический анализ широко используемых методов измерения концентрации хлорофилла в поверхностном слое морской воды показал, что методы, базирующиеся на анализе спектра отражения водной поверхности, основываются на отношении двух отсчётов спектра отражения на фиксированных длинах волн. В статье предлагается метод вычисления концентрации хлорофилла с использованием отсчётов спектра отражения водной поверхности на четырёх фиксированных длинах волн. Также предлагается свёрточно-параметрический метод измерения концентрации хлорофилла в поверхностном слое воды. Работоспособность предложенного метода подтверждена проведёнными модельными исследованиями. Для реализации предлагаемого метода могут быть применены не только способы, использующие в качестве основы спектры отражённого сигнала, но и флуоресцентные методы, базирующиеся на анализе флуоресцентного спектра.

Ключевые слова: хлорофилл, флуоресцентная спектроскопия, спектр отражения, модельные исследования, водная поверхность.

Convolution-parametric method of measuring concentration of chlorophyll *a* in sea water

F. G. Agayev, M. M. Bayramova,
National Aerospace Agency,
1 S. S. Akhundov St., Baku, AZ1106, Azerbaijan Republic,
e-mail: bayramovamm@rambler.ru

The article is devoted to development of scientific-methodical basics of the suggested new method of parametric assessment of chlorophyll concentration in sea water. The critical analysis of widely used methods for chlorophyll concentration measurement in water surface does show that the methods based on reflection spectrum of water surface use the ratio of results of measurements at two wavelengths of reflection spectrum. The aim of this research is to develop a inverse-combined parametric method for determination of chlorophyll concentration in sea water. A new method for measuring chlorophyll concentration at the four fixed wavelength of water surface reflection spectrum is suggested. Also a convolution-parametric method for measuring water surface chlorophyll concentration is suggested. The suggested convolution-parametric method for measuring chlorophyll concentration in sea water differs from the methods already known, it isn't based on calculating ratio of the measured spectral amplitudes. In the suggested method the feature of the weighted linear scalar convolution composed of anti-phase changing components to reach the extremum is used. The functional capability of the suggested method is confirmed by a theoretical-model research. During the model research the possibilities of using the suggested method for measuring chlorophyll concentration in sea water were analyzed. For realization of the suggested method one can use the methods based on reflection spectrum, as well as fluorescent methods based on fluorescent spectrum analysis. The model research has shown the operational capability of the suggested convolution-parametric method for measuring chlorophyll concentration in sea water.

Keywords: chlorophyll, fluorescent spectroscopy, reflection spectrum, model researches, water surface.

Хорошо известно, что хлорофилл, содержащийся в фитопланктоне, обитающем в морской среде, имеет большое значение при изучении оптических свойств морской воды, а также при решении вопросов рыбоводства. Хлорофилл является одним из оптически активных компонентов морской воды, к каковым обычно относят также органические растворённые в воде вещества и минеральные взвешенные частицы. Оценка концентрации хлорофилла в морской воде важна для изучения динамики морской экосистемы, для моделирования производства морской продукции, а также для оценки влияния изменений в окружающей среде. Наиболее важные оптически активные компоненты морской среды делятся на три категории:

1. Фитопланктон – группа свободно плавающих фотосинтетических организмов, включая другие микроскопические организмы, которые имеют незначительное влияние на оптические свойства морской воды (зоопланктон, гетеротрофные бактерии и т. д.).

2. Неводорослевые частицы (NAP), взвешенные органические и неорганические частицы.

3. Растворённое органическое вещество в воде.

Основным пигментом фитопланктона является хлорофилл *a*, который имеет максимальные линии поглощения в синей и красной области видимого спектра. Коэффициент обратного рассеяния фитопланктона имеет очень малое значение. Коэффициент поглощения взвешенных частиц имеет экспоненциально спадающий вид с максимумом в синей зоне. Эти частицы являются основным источником обратного рассеяния оптического излучения, попадающего на морскую воду. Спектр поглощения растворённого органического вещества имеет спадающий характер по длине волны, однако обратное рассеяние этого вещества ничтожно мало.

Настоящая статья посвящена разработке научно-методических основ предлагаемого нового метода параметрического измерения концентрации хлорофилла *a* в морской воде. Предварительно рассмотрим основные нефлуоресцентные методы, наиболее часто используемые для измерения концентрации хлорофилла *a*.

1. Метод вычисления отношения значений коэффициента поглощения на двух длинах волн в спектре отражения морской воды. Например, в работе [1] предлагается проводить измерение отношения R_{440}/R_{550} в отражённом от морской воды сигнале, а в работе

[2] предлагается воспользоваться отношением R_{700}/R_{670} , измеренном в спектре отражения.

2. Метод базовой линии [3], согласно которому высота пика в спектре отражения, вычисленная относительно прямой линии, вычерченной через точки спектра при $\lambda_1 = 670$ нм и $\lambda_2 = 750$ нм, прямо пропорциональна концентрации хлорофилла *a* в воде.

3. Метод вычисления отношения:

$$x = \frac{[\max R_{rs}(695 \leq \lambda \leq 720) - R_{rs}(\lambda = 670)]}{\max R_{rs}(695 \leq \lambda \leq 720)} \quad (1),$$

где $R_{rs}(695 \leq \lambda \leq 720)$ и $R_{rs}(\lambda = 670)$ вычисляются по спектру отражения морской воды [4]. В работе [4] показано наличие хорошей корреляции между величиной *x* и концентрацией хлорофилла *a* в воде.

4. Метод логарифмически трансформированного максимального отношения диапазонов [5]. Согласно этому методу, концентрация хлорофилла в морской воде вычисляется как:

$$[chl] = 10^{c_0 + c_1 R + c_2 R^2 + c_3 R^3 + c_4 R^4} \quad (2),$$

$$\text{где } R = \log_{10} \left(\frac{\max(R_{rs}(443); R_{rs}(488))}{R_{rs} 547} \right) \quad (3).$$

5. Метод использования наличия прямой зависимости между концентрацией хлорофилла и коэффициентом поглощения фитопланктона [6]:

$$a_{ph}(\lambda) + A(\lambda) [chl]^{B(\lambda)} \quad (4),$$

где $A(\lambda)$ и $B(\lambda)$ – спектральные коэффициенты.

При этом коэффициент поглощения фитопланктона определяется как:

$$a_{ph}(\lambda) = a_0(\lambda) + a_1(\lambda) \cdot \log_{10} \frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(490)} + a_2(\lambda) \cdot \left[\log_{10} \frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(490)} \right]^2 + a_3(\lambda) \cdot \left[\log_{10} \frac{R_{rs}(670)}{R_{rs}(490)} \right]^3 \quad (5),$$

где $a_1(\lambda)$, $a_2(\lambda)$ и $a_3(\lambda)$ – спектральные коэффициенты.

Вышеприведённый краткий обзор существующих нефлуоресцентных методов определения концентрации хлорофилла в морской воде с помощью вычисления отношений различных спектральных отсчётов показывает, что во всех

случаях используется только одна пара спектральных отсчётов, вычисленное отношение которых, в принципе, и определяет искомую концентрацию хлорофилла в морской воде. В то же время, вполне возможно использование в качестве базовой формулы для вычисления хлорофилла линейной скалярной свёртки двух различных функций отношений экспериментально определённых отсчётов.

Цель работы: разработка научно-методических основ предлагаемого инверсно-комбинированного параметрического метода определения концентрации хлорофилла в морской воде.

Задачами исследования являются: 1. Разработка обобщённого метода вычисления концентрации хлорофилла на основе двух отношений спектральных отсчётов на четырёх длинах волн в отражательном спектре. 2. Разработка свёрточно-параметрического метода измерения концентрации хлорофилла a в морской воде.

Решение задач исследования

Рассмотрим первую задачу исследования. Выражение (4) запишем в следующем виде:

$$[chl]^{B(\lambda)} = \frac{a_{ph}(\lambda)}{A(\lambda)} \quad (6).$$

Выражение (6) в обобщённом случае можно записать как:

$$F_1(chl) = f_1(ratio_1) \quad (7),$$

$$\text{где } ratio_1 = \frac{R_{rs}(\lambda_1)}{R_{rs}(\lambda_2)} \quad (8).$$

Из выражения (7) получим:

$$chl = F_1^{-1}[f_1(ratio_1)] \quad (9).$$

Как было отмечено выше, согласно работе [6], $\lambda_1 = 670$ нм; $\lambda_2 = 490$ нм. В соответствии с работой [7], для неглубоких водоёмов и береговых вод λ_1 может быть выбран из следующего множества: {412 нм; 443 нм; 490 нм; 510 нм} при $\lambda_2 = 555$ нм.

Можно показать, что любой из n количества вышеперечисленных методов, основывающихся на вычислении отношения двух спектральных отсчётов в спектре отражения, может быть представлен в обобщённой форме подобно выражению (9). В этом случае имеем:

$$chl = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i^{-1}[f_i(ratio_{i_i})] \quad (10).$$

Таким образом, выражение (10) является математическим выражением предлагаемого обобщённого метода вычисления концентрации хлорофилла в морской воде.

Рассмотрим вторую задачу исследования. Предлагаемый свёрточно-параметрический метод измерения концентрации хлорофилла a в морской воде, в отличие от вышерассмотренных методов, не основан на вычислении отношений спектральных отсчётов. В предлагаемом методе используется экстремальное свойство взвешенной линейной скалярной свёртки, составленной из противофазно изменяющихся компонентов. Для пояснения сути предлагаемого метода воспользуемся результатами экспериментальных исследований, проведённых в береговой зоне [7]. На рисунке 1 приведены зависимости интенсив-

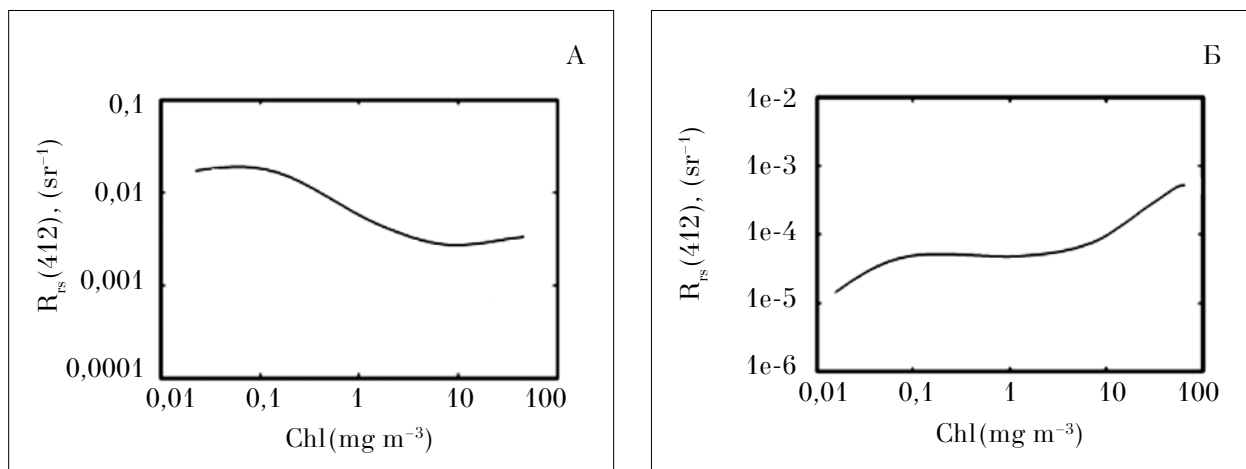


Рис. 1. Экспериментально полученные кривые зависимости интенсивности отраженного от морской воды сигнала от концентрации хлорофилла в воде. Кривые вычислены на базе экспериментальных данных с использованием алгоритма OC2 проекта SeaBAM [8]

ности отражённого от морской воды сигнала от концентрации хлорофилла при длинах волн $\lambda = 412$ нм и $\lambda = 670$ нм.

Как видно из графиков, приведённых на рисунке 1, соответствующие кривые на этих графиках могут быть отображены следующими функциями:

$$R_{rs}(412) + F_1(chl) \quad (11),$$

$$R_{rs}(670) + F_2(chl) \quad (12).$$

При этом функции F_1, F_2 являются монотонными функциями своих аргументов; функция F_1 является убывающей функцией своего аргумента, F_2 – возрастающей.

В этом случае возможно составление линейной скалярной свёртки:

$$F_0 = \alpha_1 \cdot F_1(chl) + (1 - \alpha_1) F_2(chl) \quad (13),$$

где α_1 – весовой коэффициент; $\alpha \leq 1$.

Согласно теории многокритериальной оптимизации для противофазных функций $F_1(chl)$ и $F_2(chl)$ скалярная свёртка в виде (13) имеет экстремум от аргумента chl . При этом величина chl , при которой F_0 достигает экстремума, и будет зависеть от значения коэффициента α_1 . С учётом вышеизложенного предлагается свёрточно-параметрический метод определения величины концентрации хлорофилла в морской воде, алгоритм реализации которого заключается в следующем:

1. Путём измерения определяются функции F_1 и F_2 .
2. Составляется свёртка (13).
3. Экспериментально определяется величина параметра α_1 в диапазоне $0 < \alpha \leq 1$, при которой фиксируется экстремум F_{0extr} .
4. Используя зависимость:

$$F_{0extr} = \alpha_1 \cdot F_1(chl_0) + (1 - \alpha_1) F_2(chl_0) \quad (14),$$

определяют искомую величину chl_0 .

Чтобы показать работоспособность предлагаемого метода, проведём теоретическое модельное исследование.

Модельные исследования

В ходе модельных исследований проведён анализ возможности использования предлагаемого метода определения концентрации хлорофилла в морской воде, а также анализ условий достижения свёрткой (13) экстремального значения.

Представим функции $F_1(chl)$ и $F_2(chl)$ в виде разложения в ряд Тейлора и оставим для упрощения выкладок первые три члена ряда:

$$F_1(chl) = F_{10} + F'_{10} \cdot chl + \frac{F''_{10} \cdot chl^2}{2} \quad (15),$$

$$F_2(chl) = F_{20} + F'_{20} \cdot chl + \frac{F''_{20} \cdot chl^2}{2} \quad (16).$$

С учётом выражений (13), (15), (16) получим:

$$F_0 = \alpha_1 (F_{10} + F'_{10} \cdot chl + \frac{F''_{10} \cdot chl^2}{2}) + (1 - \alpha_1) (F_{20} + F'_{20} \cdot chl + \frac{F''_{20} \cdot chl^2}{2}) \quad (17).$$

Исследуем выражение (17) на экстремум методом производных. Получаем:

$$\alpha_1 \cdot F'_{10} + \alpha_1 \cdot F''_{10} \cdot chl + (1 - \alpha_1) \cdot (F'_{20} + F''_{20} \cdot chl) = 0 \quad (18).$$

Из выражения (18) находим:

$$chl \cdot [\alpha_1 \cdot F''_{10} + (\alpha_1 - 1) \cdot F''_{20}] = \alpha_1 \cdot F'_{10} + (\alpha_1 - 1) \cdot F'_{20} \quad (19).$$

Из (19) окончательно имеем:

$$chl = \frac{\alpha_1 F'_{10} + (\alpha_1 - 1) F'_{20}}{\alpha_1 F''_{10} + (\alpha_1 - 1) F''_{20}} \quad (20).$$

Таким образом, так как $F'_{10}, F'_{20}, F''_{10}, F''_{20}$ заранее известны, при фиксированной величине α_1 по достижению F_0 экстремального значения chl может быть вычислен по формуле (20) или определён по заранее вычисленной номограмме зависимости chl от α_1 .

Нетрудно показать, что при

$$\frac{F'_{10}}{F''_{10}} \leq \frac{\alpha_1 - 1}{\alpha_1} \quad (21)$$

F_0 достигает максимальной величины, а в противном случае – минимального значения. На рисунке 2 приведён вычисленный на основе экспериментальных данных, опубликованных в [7], график зависимости α_1 от значения концентрации хлорофилла, при котором функция F_0 достигает максимальной величины.

С учётом вышеизложенного можно предложить следующую методику определения концентрации хлорофилла a в морской воде.

Проводится экстремальное исследование значения F_{0extr} в зависимости от весового коэф-

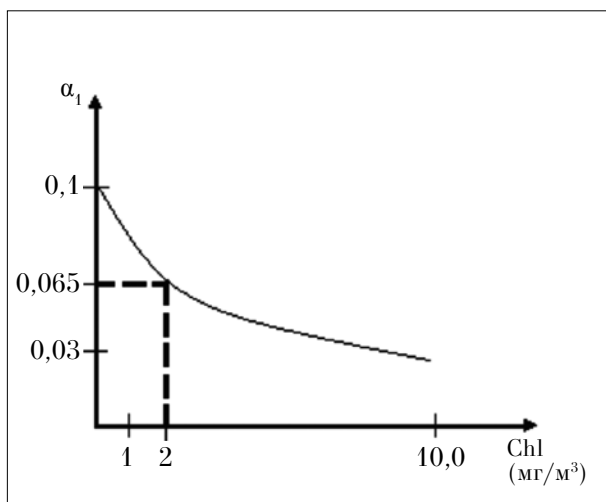


Рис. 2. График зависимости величины весового коэффициента α_1 , при котором наблюдается экстремум функции F_{0^*} , от значения концентрации хлорофилла

фициента α_1 и определяются соответствующие величины α_1 и $F_{0^{extr}}$ в точке экстремума.

Используется выражение (14), а также вычисленные величины α_1 и $F_{0^{extr}}$, определяется значение концентрации хлорофилла. С этой целью также может быть использован график, показанный на рисунке 2, согласно которому при весовом коэффициенте, равном 0,005, получим концентрацию хлорофилла, равную 2 мг/м³.

Обсуждения и выводы

Таким образом, проведённые модельные исследования показали работоспособность предлагаемого свёрточно-параметрического метода измерения концентрации хлорофилла в морской воде. Следует отметить, что для реализации предлагаемого метода могут быть использованы не только вышерассмотренные известные способы, использующие в качестве основы спектры отражённого сигнала, но и флуоресцентные методы, базирующиеся на анализе флуоресцентного спектра при возбуждении поверхности морских вод лазерным пучком.

Сформулируем основные выводы проведённого исследования:

1. Проведён краткий обзор наиболее часто используемых методов измерения концентрации хлорофилла в морской воде. Отмечено,

что все методы, базирующиеся на спектре отражения морских вод, используют в качестве информативного показателя отношения двух отсчётов на фиксированных длинах волн в спектре отражения.

2. Разработан обобщённый метод вычисления концентрации хлорофилла на основе множества отношений спектральных отсчётов при двух длинах волн на спектре отражения морской воды.

3. Разработан свёрточно-параметрический метод измерения концентрации хлорофилла в морской воде. Проведённые теоретические модельные исследования подтвердили работоспособность предложенного метода.

References

1. Gordon H., Morel A. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery. A Review, Springer Verlag, New York, 1983. 114 p.
2. Gitelson A., Nikanorov A.M., Sabo G., Szilagyi F. Etude de qualite des eaux de surface par teledetection, OAH Publications, 1986. 157 p.
3. Gitelson A.A., Yacobi Y.Z., Rundquist D.C., Stark R., Han L., Etzion D. Remote estimation of chlorophyll concentration in productive waters: Principals, algorithm development and validation // Advances in limnology. Stuttgart. 2000. V. 55. P. 121–136.
4. Ficek D., Zapadka T., Dera J. Remote sensing reflectance of Pomeranian lakes and the Baltic. Oceanologia. 2011. V. 53 (4). P. 959–970.
5. Lapucci Ch., Rella M.A., Brandini C., Ganzin N., Gozzini B., Maselli F., Massi L., Nuccio C., Ortolani A., Trees Ch. Evaluation of empirical and semi – analytical chlorophyll algorithms in the Ligurian and North Tyrrhenian Seas // Journal of Applied Remote Sensing. 2012. V. 6. P. 1–21.
6. Tiwari S.P., Shanmugam P. An optical model for the remote-sensing of absorption coefficients of phytoplankton in oceanic // Coastal Waters. Advances in Remote Sensing. 2012. V. 1. P. 19–34.
7. Cannizarro J.P., Carder K.L. Estimating chlorophyll a concentrations from remote-sensing reflectance in optically shallow waters // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 101. P. 13–24.
8. O'Reilly J.E., Maritorena S., Mitchell B.G., Siegel D.A., Carder K.L., et.al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // Journal of Geophysical Research. 1998. V. 103. P. 24937–24953.