

**ДВУХВОЛНОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
ВЗВЕШЕННЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В МОРСКОЙ ВОДЕ****DUAL WAVELENGTH METHOD FOR DETERMINING CONCENTRATION
OF SUSPENDED SOLIDS IN SEAWATER**

Ключевые слова: хлорофилл, морская вода, мониторинг, взвешенные частицы, атмосфера, калибровка, валидация, обратное рассеяние, двухволновый метод.

В настоящее время задача осуществления мониторинга степени загрязнения морской воды успешно решается с помощью различных методов и средств дистанционного зондирования. Особенность загрязнения береговых зон заключается в наличии в морской воде таких компонентов, как хлорофилл, минеральная взвесь и растворенное ограниченное вещество. Оптические свойства загрязненных береговых вод характеризуются совместным влиянием всех вышеуказанных компонентов. Это обстоятельство приводит к необходимости применения многоволновых методов дистанционного зондирования морской воды береговых зон. В частности широко используются трехволновые методы измерения. Предлагается двухволновый метод определения концентрации взвешенных твердых загрязняющих частиц в морской воде, предусматривающий проведение совместных двухволновых измерений параметра, зависящего от условий проведения эксперимента, концентрации хлорофилла и взвешенных твердых частиц, а также автономного двухволнового измерения концентрации хлорофилла. Указана возможность реализации некоторой вариации метода, когда автономно измеряется концентрация взвешенных частиц, используя при этом несколько смещенные значения длин волн. Показано, что результаты, полученные при реализации предлагаемых методов, могут быть проконтролированы

путем пробного определения параметра, зависящего от условий эксперимента.

Keywords: chlorophyll, seawater, monitoring, suspended solids, atmosphere, calibration, validation, back-scattering, dual wavelength method.

At present time the monitoring of seawater pollution is performed by various remote sensing techniques. The features of coastal zones' pollution involve the presence of such components as chlorophyll, mineral suspended particles and diluted organic matter in seawater. The optical properties of polluted coastal water are characterized with the combined effect of all above mentioned components. That necessitates the application of multi-wavelength techniques of remote sensing of seawater in coastal zones. Particularity, three-wavelength techniques are widely used. This paper proposes a dual wavelength method for determining the concentration of suspended solids in seawater. The method involves performing combined dual wavelength measurements of parameter which depends on the conditions of the experiment, the concentration of chlorophyll and suspended solids and a separate dual wavelength measurement of chlorophyll concentration. It is pointed out that some variations are possible when the concentration of suspended solids is measured separately using somewhat shifted values of wavelength. It is shown that the results obtained by the proposed techniques may be verified by test determination of the parameter which depends on the conditions of the experiment.

Мамедбейли Ателлай Габидулла оглы, нач. отдела, НИИ аэрокосмической информатики, г. Баку, Азербайджанская республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Асадов Хикмет Гамид оглы, д.т.н., нач. отдела, НИИ аэрокосмической информатики, г. Баку, Азербайджанская республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Абдуллаева Лятифа Джафарага гызы, диссертант, НИИ аэрокосмической информатики, г. Баку, Азербайджанская республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Тахмазлы Матанат Сахиб гызы, диссертант, Институт космических исследований природных ресурсов, г. Баку, Азербайджанская республика. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Mammadbeyli Atellay Gabibulla ogly, Head of Division, Research Institute of Aerospace Informatics, Baku, Azerbaijani Republic. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Asadov Khikmet Gamid ogly, Dr. Tech. Sci., Head of Division, Research Institute of Aerospace Informatics, Baku, Azerbaijani Republic. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Abdullayeva Lyatifa Dzhafaraga gyzy, Degree Applicant, Research Institute of Aerospace Informatics, Baku, Azerbaijani Republic. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Takhmazly Matanat Sakhib gyzy, Degree Applicant, Institute of Space Research of Natural Resources, Baku, Azerbaijani Republic. E-mail: asadzade@rambler.ru.

Введение

Хорошо известно, что методы дистанционного зондирования позволяют осуществить мониторинг степени загрязненности морской

воды на больших географических территориях. Как указывается в работе [1], при дистанционном исследовании вод небереговых морских просторов для восстановления пока-

зателей загрязненности вод по спутниковым данным применяются простые полуэмпирические алгоритмы [2]. Однако при рассмотрении проблемы загрязненности вод береговых зон задача исследования достаточно усложняется. Береговые воды содержат такие компоненты, как фитопланктон, минеральная взвесь и растворенное органическое вещество. Как результат, оптические свойства береговых вод определяются совместным оптическим влиянием всех указанных компонентов. Согласно [1], указанное обстоятельство существенно затрудняет восстановление содержания лишь одного компонента, и возникает необходимость разработки и применения алгоритмов, способных одновременно восстанавливать концентрации всех вышеуказанных компонентов раздельно. Вместе с тем при стабильных условиях экологического загрязнения морских бассейнов в качестве исходного предположения можно принять тезис о том, что в течение некоторого интервала времени концентрация хлорофилла и взвешенных частиц в морской береговой зоне постоянна. При таком допущении появляется возможность проведения космических бортовых измерений с использованием предыдущих достоверных космических данных о содержании хлорофилла в воде с целью исследования свойств поглощения и рассеяния взвешенных морских твердых частиц.

Излагаются теоретические основы разработки нового метода дистанционного определения концентрации взвешенных твердых частиц в морской воде, в котором количество используемых длин волн уменьшено с 3 до 2.

Постановка задачи

Несколько подробно рассмотрим теоретические основы известного трехволнового метода определения вышеуказанных компонентов загрязнения береговых вод.

Согласно работе [3], отраженный от морской воды сигнал дистанционного зондирования пропорционален следующему отношению коэффициентов обратного рассеяния и поглощения:

$$R_s = C \cdot \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)}, \quad (1)$$

где C – постоянная, зависящая от условий проведения измерений;

$b_b(\lambda)$ – спектральный коэффициент суммарного обратного рассеяния, m^{-1} ;

$$R_{rs} = C \cdot \frac{b_{b,w} + k_1(\lambda) \cdot C_{Chl}^{k_2(\lambda)} + b_{b,s}(\lambda) \cdot C_s}{a_w + A(\lambda) \cdot C_{Chl}^{B(\lambda)} + a_s(\lambda) \cdot C_s + b_{b,w} + k_1(\lambda) \cdot C_{Chl}^{k_2(\lambda)} + b_{b,s}(\lambda) \cdot C_s}. \quad (6)$$

Если допустить, что $a_s(\lambda), b_{b,s}(\lambda), k_1(\lambda), k_2(\lambda), a_w, A(\lambda), B(\lambda)$ являются известными величинами, то путем проведения измерений R_{rs} на различных длинах волн можно определить следующие неизвестные: C, C_{Chl}, C_s .

$a(\lambda)$ – спектральный коэффициент суммарной абсорбции, m^{-1} ;

λ – длина волны.

Следует отметить, что коэффициенты обратного рассеяния различных водоемов сильно различаются друг от друга в зависимости от степени загрязнения самих водоемов. Для сравнения на рисунке а, б приведены кривые спектральной зависимости коэффициента обратного рассеяния для Балтийского моря (рис. 1 а) и загрязненных озер (рис. б) [3].

Как указывается в работе [4], суммарный коэффициент абсорбции морских вод определяется как

$$a_{\Sigma} = a_w + a_{Chl} \cdot C_{Chl} + a_s \cdot C_s, \quad (2)$$

где a_w – коэффициент абсорбции чистой воды;

a_{Chl} – коэффициент абсорбции хлорофилла;

a_s – коэффициент абсорбции взвешенных частиц;

C_{Chl} и C_s – соответственно, концентрации в воде хлорофилла и взвешенных частиц.

Согласно работе [4], суммарный коэффициент обратного рассеяния морских вод определяется как

$$b_{\Sigma} = b_{b,w} + b_{b,Chl} \cdot C_{Chl} + b_{b,s} \cdot C_s, \quad (3)$$

где $b_{b,w}$ – коэффициент обратного рассеяния чистой воды;

$b_{b,Chl}$ – коэффициент обратного рассеяния хлорофилла;

$b_{b,s}$ – коэффициент обратного рассеяния взвешенных твердых частиц.

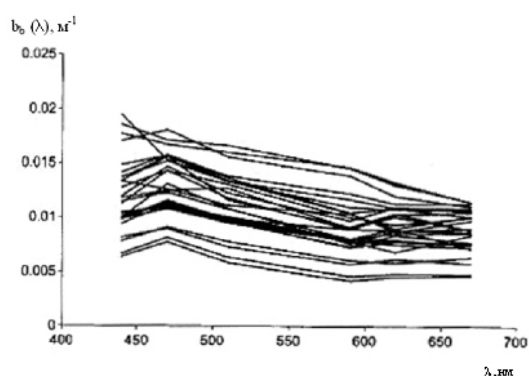
Как указывается в работе [5], имеют место следующие зависимости коэффициентов поглощения и обратного рассеяния хлорофилла от концентрации хлорофилла:

$$a_{Chl}(\lambda) = A(\lambda) \cdot C_{Chl}^{B(\lambda)}; \quad (4)$$

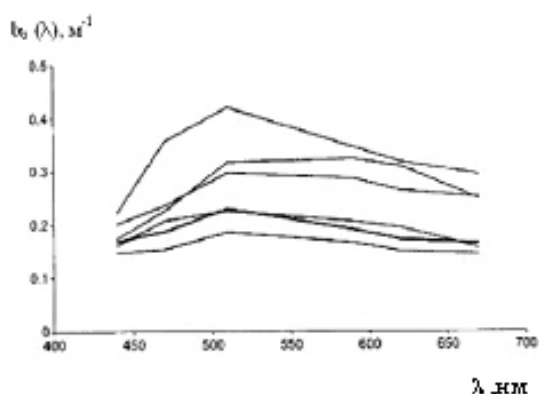
$$b_{Chl}(\lambda) = k_1(\lambda) \cdot C_{Chl}^{k_2(\lambda)}, \quad (5)$$

где $A(\lambda), B(\lambda), k_1(\lambda), k_2(\lambda)$ – табулированные величины, зависящие от длины волны.

Таким образом, с учетом выражений (1)-(5) отраженный от морской воды сигнал дистанционного зондирования определится следующим образом:



а



б

Рис. Кривые спектральной зависимости обратного рассеяния: а – для Балтийского моря [3]; б – для вод заливов Мууга и Матсалу, Эстония

Таким образом, очевидно, что для определения вышеуказанных неизвестных необходимо осуществить измерения R_{rs} на трех длинах волн и далее, составив систему из трех уравнений, решить ее относительно указанных параметров. Однако можно показать, что количество длин волн, необходимых для проведения таких измерений, может быть уменьшено до двух.

Для минимизации используемого количества длин волн предлагается метод параллельного совместного и автономного определения показателей загрязнения морской воды.

Решение задачи

Предлагаемый метод базируется на предположении о том, что в основном отражен-

ный от морской воды сигнал является диффузно рассеянным излучением, т.е. $R_{rs} = R_d$. В этом случае, согласно работам [6, 7], концентрация хлорофилла на верхнем слое воды определяется как

$$C_{Chl} = 1,92 I_C^{1,8}, \tag{7}$$

где
$$I_C = \frac{R_d(550)}{R_d(440)}, \tag{8}$$

где $R_d(550)$ и $R_d(440)$ – диффузное отражение сигнала с морской поверхности, измеренные на длинах волн 550 и 440 нм.

С учетом выражений (6)-(8) получим

$$R_{r,s} = C \cdot \frac{b_{b,w} + k_1(\lambda) \cdot \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(\lambda)}}{a_w + A(\lambda) \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{-B(\lambda)} + a_s(\lambda) \cdot C_3 + b_{b,w} + k_1(\lambda) \cdot \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(\lambda)} + b_{b,s}(\lambda) C_s} \tag{9}$$

Следовательно, чтобы вычислить неизвестные C_s и C , достаточно провести измерения диффузно отраженных сигналов на длинах волн 550 и 440 нм. Таким образом, для вычисления C_s и C получаем два алгебраических уравнения:

$$R_d(550) = C \cdot \frac{b_{b,w} + k_1(550) \left[1,92 \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(550)}}{a_w + A(550) \left[1,92 \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{-B(550)} + a_s(550) C_3 + b_{b,w} + k_1(550) \left[1,92 \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(550)} + b_{b,s}(550) C_s} \tag{10}$$

$$R_d(440) = C \cdot \frac{b_{b,w} + k_1(440) \left[1,92 \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(440)}}{a_w + A(550) \left[1,92 \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{-B(440)} + a_s(440) C_3 + b_{b,w} + k_1(440) \left[1,92 \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(440)} + b_{b,s}(440) C_s} \tag{11}$$

Систему уравнений (10), (11) запишем в следующем виде

$$d_{01} = \frac{C \cdot d_1}{d_2 + d_3 \cdot C_s}, \quad (12)$$

$$d_{02} = \frac{C \cdot d_4}{d_5 + d_6 \cdot C_s}, \quad (13)$$

где

$$d_{01} = R_d(550),$$

$$d_1 = b_{b.w} + k_1(550) \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(550)},$$

$$d_2 = a_w + A(550) \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{-B(550)} + b_{b.w} + k_1(550) \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(550)},$$

$$d_3 = a_s(550) + b_{b.s}(550),$$

$$d_{02} = R_d(440),$$

$$d_4 = b_{b.w} + k_1(440) \cdot \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(440)},$$

$$d_5 = a_w + A(440) \cdot \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{-B(440)} + b_{b.w} + k_1(440) \left[1,92 \cdot \frac{R_d(550)}{R_d(440)} \right]^{1,8k_2(440)},$$

$$d_6 = a_s(440) + b_{b.s}(440).$$

Решение системы уравнений (12), (13) получено в виде

$$C_s = \frac{d_4 d_{01} d_2 - d_{02} d_1 d_5}{d_{02} d_1 d_6 - d_4 d_{01} d_3}; \quad (14)$$

$$C = \frac{d_{01} d_2}{d_1} + \frac{d_{01} d_3}{d_1} \left[\frac{d_4 d_{01} d_2 - d_{02} d_1 d_5}{d_{02} d_1 d_6 - d_4 d_{01} d_3} \right]. \quad (15)$$

Таким образом, предлагаемый метод позволяет уменьшить количество длин волн проводимых измерений от трех до двух и далее вычислять параметры C_s и C по формулам (14) и (15).

Обсуждение результатов

Для проверки достоверности полученных результатов можно предложить следующий метод. Используя выражение (1) и осуществив измерения суммарных показателей рассеяния $b_b(\lambda)$ и абсорбции $a(\lambda)$, можно вычислить величину C и сравнить полученную величину со значением аналогичного параметра, полученного по предлагаемому методу. Совпадение двух значений C будет свидетельствовать о достоверности полученной оценки C_s .

Отметим, что возможна некоторая вариация предлагаемого метода, в которой взамен выражений (7) и (8) используется следующее выражение:

$$C_s = 17,783 \left[\frac{R(670)}{R(555)} \right]^{1,11}. \quad (16)$$

В этом случае ставится задача вычисления концентрации хлорофилла, а автономно определяемым параметром является концентрация взвешенных твердых частиц C_s . При этом совместные измерения в отличие от предыдущего случая должны быть проведены на длинах волн 670 и 555 нм. Контроль достоверности полученного значения C_{chl} в этом методе также может быть проведен в соответствии с вышеизложенным, по параметру C .

Заключение

1. Предложен двухволновой метод определения концентрации взвешенных твердых загрязняющих частиц в морской воде, предусматривающий проведение совместных двухволновых измерений параметра, зависящего от условий проведения эксперимента, концентрации хлорофилла и взвешенных твердых частиц, а также автономного двухволнового измерения концентрации хлорофилла.

2. Указана возможность реализации некоторой вариации метода, когда автономно измеряется концентрация взвешенных частиц, используя при этом несколько смешанные значения длин волн.

3. Показано, что результаты, полученные при реализации предлагаемых методов, могут быть проконтролированы путем пробного определения параметра, зависящего от условий эксперимента.

Библиографический список

1. Коросов А.А., Поздняков Д.В. Оценка состояния и тенденции изменения первично продуктивности Белого моря по данным дистанционного зондирования за последние пять лет: методы и первые результаты // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря: матер. IX Междунар. конф. (11-14 октября 2004 г.). – Петрозаводск, 2005. – С. 165-171.
2. Ackleson S. Ocean optics research at the start of the 21st century // *Oceanography*. – 2001. – № 14. – P. 5-8.
3. Kutser T., Hiire M., Metsamaa L. Vahtmae E., Paavel B. Aps R. Field measurements of spectral backscattering coefficient of the Baltic Sea and boreal lakes // *Boreal Environment Research*, Helsinki 30 April 2009. – Vol. 14. – P. 305-312.
4. Wozniak S.B., Stramski D. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms // *Applied Optics*, 10 June 2004. – Vol. 43. – № 17. – P. 3489-3503.
5. Arst H., Haltrin V. Components of remote sensing reflectance of northern Baltic natural water basins / *Proceedings of the Seventh International Conference of Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*. 20-22 May, 2002, USA. – P. 321-328.
6. Haltrin V. Chlorophyll-based model of seawater optical properties // *Applied Optics*, Vol. 38, № 33 / 20 November 1999. – P. 6826-6832.
7. D'Sa E.J., Miller R.L., McKee B.A. Suspended particulate matter dynamics in coastal water from ocean color: Application to the northern Gulf of Mexico // *Geophysical Research Letters*, 2007. – Vol. 34, L23611. doi: 10.1029/2007GL031192.

search Letters, 2007. – Vol. 34, L23611. doi:10.1029/2007GL031192.

References

1. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V. Otsenka sostoyaniya i tendentsii izmeneniya pervichno produktivnosti Belogo morya po dannym distantsionnogo zondirovaniya za poslednie pyat' let: Metody i pervye rezultaty / *Problemy izucheniya, ratsional'nogo ispol'zovaniya i okhrany resursov Belogo morya // Mater. IX mezhdunar. konf. 11-14 oktyabrya 2004 g., Petrozavodsk, Kareliya, Rossiya. – Petrozavodsk, 2005. – S. 165-171.*
2. Ackleson S. Ocean optics research at the start of the 21st century // *Oceanography*. – 2001. – № 14. – P. 5-8.
3. Kutser T., Hiire M., Metsamaa L. Vahtmae E., Paavel B. Aps R. Field measurements of spectral backscattering coefficient of the Baltic Sea and boreal lakes // *Boreal Environment Research*, Helsinki, 30. April 2009. – Vol. 14 – P. 305-312.
4. Wozniak S.B., Stramski D. Modeling the optical properties of mineral particles suspended in seawater and their influence on ocean reflectance and chlorophyll estimation from remote sensing algorithms // *Applied Optics*, 10 June 2004. – Vol. 43. – № 17. – P. 3489-3503.
5. Arst H., Haltrin V. Components of remote sensing reflectance of northern Baltic natural water basins / *Proceedings of the Seventh International Conference of Remote Sensing for Marine and Coastal Environments*. 20-22 May, 2002, USA. – P. 321-328.
6. Haltrin V. Chlorophyll-based model of seawater optical properties // *Applied Optics*, Vol. 38, № 33 / 20 November 1999. – P. 6826-6832.
7. D'Sa E.J., Miller R.L., McKee B.A. Suspended particulate matter dynamics in coastal water from ocean color: Application to the northern Gulf of Mexico // *Geophysical Research Letters*, 2007. – Vol. 34, L23611. doi: 10.1029/2007GL031192.

