

References

1. Morkovkin G.G., Baykalova T.V., Maksimova N.B., Ovtsinov V.I., Litvinenko E.A., Demina I.V., Demin V.A. Antropogennaya transformatsiya pakhotnykh pochv stepnoy zony Altayskogo kraya // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2014. – № 6. – S. 43-48.
2. Karpova L.A. Ekologicheskiy karkas territorii Krasnogorskogo i Sovetskogo rayonov Altayskogo kraya // Izvestiya Biyskogo otdeleniya Russkogo geograficheskogo obshchestva. – Biysk: FGBOU AGAO, 2012. – Vyp. 33. – S. 137-141.
3. Baykalova T.V. Kartografirovaniye protsessov degradatsii pochvennogo pokrova // Geografiya i prirodopol'zovanie Sibiri: sbornik statey. – Barnaul: Izd-vo AltGU, 2011. – Vyp. 13. – S. 26-32.
4. Shovengerdt R.A. Distantionnoye zondirovaniye. Modeli i metody obrabotki izobrazheniy. – M.: Tekhnosfera, 2010. – 560 s.
5. Kashkin V.B., Sukhinin A.I. Distantionnoye zondirovaniye Zemli iz kosmosa: uchebnoye posobie. – M.: Logos, 2001. – 264 s.
6. Kochurov B.I. Ekodiagnostika i sbalansirovannoye razvitiye: uchebnoye posobie. – M. – Smolensk: Madzhenta, 2003. – 384 s.
7. Isachenko A.G. Ekologicheskaya geografiya Rossii. – SPb.: Izd-vo Sankt-Peterburgskogo un-ta, 2001. – 328 s.
8. Reymers N.F. Prirodopol'zovanie: slovar'-spravochnik. – M.: Mysl', 1990. – 639 s.
9. Morkovkin G.G., Baykalova T.V., Maksimova N.B., Ovtsinov V.I., Litvinenko E.A., Demina I.V., Demin V.A. Dinamika sostoyaniya pochvennogo pokrova i pokazateley plodorodiya pochv osnovnykh prirodno-pochvennykh zon Altayskogo kraya // Vestnik altayskoy nauki. – 2015. – № 1 (23). – S. 212-222.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда РФФИ и Администрации Алтайского края, грант № 16-45-220163 p_a.



УДК 551.46.08

М.М. Байрамова, С.Н. Абдуллаева, Е.Н. Алиева
M.M. Bayramova, S.N. Abdullayeva, Ye.N. Aliyeva

**ЭНТРОПИЙНАЯ ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
 КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В МОРСКОЙ ВОДЕ**

**ENTROPIC EVALUATION OF INFORMATION VALUE OF SATELLITE MEASUREMENTS
 OF SEA WATER CHLOROPHYLL CONCENTRATION**

Ключевые слова: хлорофилл, энтропия, измерения, информативность, флуоресценция, спектрорадиометр.

Keywords: chlorophyll, entropy, measurements, information value, fluorescence, spectral radiometer.

Известно, что спутниковые флуоресцентные методы измерения хлорофилла требуют учета следующих особенностей взаимосвязи измеряемых излучений и составляющих морской среды: 1. Взаимосвязь между интенсивностью флуоресцентного излучения хлорофилла и концентрацией этого вещества характеризуется высокой изменчивостью 2. Флуоресцентное излучение хлорофилла а, имея максимум на длине волны 685 нм, сильно поглощается морской водой. По этой причине дистанционно может быть зарегистрировано флуоресцентное излучение, исходящее только из верхнего слоя морской воды. Показано, что известные методы спутниковых измерений концентрации хлорофилла в морской воде допускают их совместное использование в проведении двухволновых измерений. При этом неучет флуоресцентной составляющей входной радиации спектрорадиометров может несколько уменьшить энтропийную оценку информативности результатов проводимых измерений.

It is well-known that satellite methods of chlorophyll measurements require taking into account the following features of interrelations of measured emissions and components of sea media: 1) the interrelation of chlorophyll fluorescent emission intensity and its concentration is highly variable; 2) fluorescent emission of chlorophyll a having its maximum at the wavelength of 685 nm is heavily absorbed by sea water, and therefore only the fluorescent emission generated in the upper layer of sea water can be detected remotely. It is shown that the known methods of satellite measurements of chlorophyll concentration in sea water allow the joint use in two wavelengths measurements. At the same time the neglect of fluorescent component of input radiation of spectral radiometers may somewhat decrease the entropic evaluation of the information value of the performed measurement results.

Байрамова Махира Магомед гызы, н.с., диссертант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: bayramovamm@rambler.ru.

Абдуллаева Севиндж Новруз гызы, к.т.н., доцент, Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: abdullayevasn@rambler.ru.

Алиева Егане Новруз гызы, к.т.н., нач. отдела, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. E-mail: yegane.aliyeva.1969@mail.ru.

Bayramova Mahira Mohammad gizi, Staff Scientist, degree applicant, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: bayramovamm@rambler.ru.

Abdullayeva Sevinj Novruz gizi, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: abdullayevasn@rambler.ru.

Aliyeva Yegane Novruz gizi, Cand. Tech. Sci., Head of department, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. E-mail: yegane.aliyeva.1969@mail.ru.

Введение

Хорошо известно, что для реализации флуоресцентного метода измерения концентрации хлорофилла, содержащегося в фитопланктонах, могут быть использованы как искусственные источники возбуждающего излучения [1], так и солнечное излучение [2, 3].

Для осуществления флуоресцентного дистанционного зондирования хлорофилла в морской воде использовались как самолетные измерения [4], так и спутниковые измерения с помощью спектрорадиометров MERIS и MODIS.

Согласно работе [5], спутниковые флуоресцентные методы измерения хлорофилла требуют учета двух особенностей взаимосвязи измеряемых излучений и составляющих морской среды:

1. Взаимосвязь между интенсивностью флуоресцентного излучения хлорофилла и концентрацией этого вещества характеризуется высокой изменчивостью и зависит как от времени, так и от конкретной местности.

2. Следует учесть, что флуоресцентное излучение хлорофилла *a*, имея максимум на длине волны 685 нм, сильно поглощается морской водой, и по этой причине дистанционно может быть зарегистрировано флуоресцентное излучение, исходящее только из верхнего слоя морской воды.

Вместе с тем для измерения концентрации хлорофилла также широко используется метод отношения сигналов отражения морской воды на двух длинах волн (700, 680 нм) или (550, 450 нм). Этот метод также был использован с помощью спектрорадиометра MERIS [6] с использованием солнечного излучения.

Следует предположить, что при использовании первой пары вышеуказанных длин волн дистанционный измеритель регистрирует как отраженные сигналы от поверхности моря, так и флуоресцентный сигнал, с генерированным поверхностным слоем морской воды.

Целью исследований является выяснение влияния такого суммирования измеряемых сигналов на общую информативность проводимых измерений по методу отношения двух длин волн.

Метод исследований

Как указывается в работе [5], сигнал флуоресцентной эмиссии хлорофилла имеет достаточно узкую спектральную полосу (рис. 1).

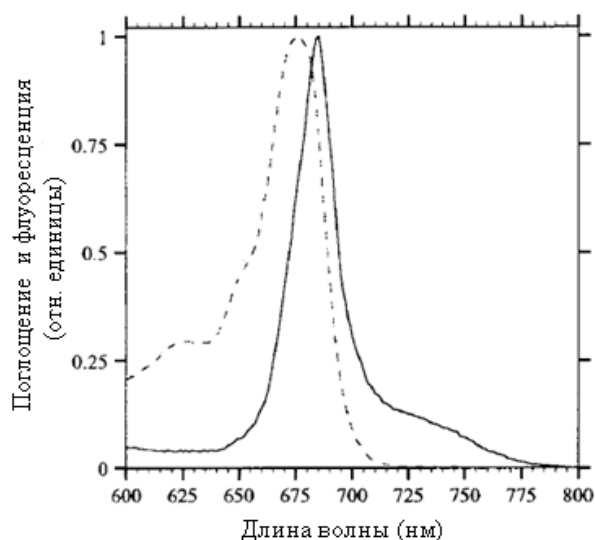


Рис. 1. Эмиссионный спектр флуоресцентного сигнала (сплошная линия) и кривая поглощения (пунктир) фитопланктона [5]

Согласно работе [6], результат двухволновых измерений концентрации хлорофилла *a* с помощью спектрорадиометра MERIS хорошо аппроксимируется линейной функцией в виде

$$C_{Chla} = a_1 \cdot \frac{R(\lambda_1)}{R(\lambda_2)}, \quad (1)$$

где $a_1, b_1 = \text{const}$;

$R(\lambda_1), R(\lambda_2)$ – отраженные сигналы, соответственно, на длинах волн 700 и 680 нм.

Разумно предположить, что фоточувствительные детекторы MERIS регистрируют не только отраженные сигналы, но и флуоресцентное излучение верхнего слоя воды, т.е. выражение (2) должно быть записано в следующем виде

$$C_{Chla} = a_1 \cdot \frac{R(\lambda_1) + F(\lambda_1)}{R(\lambda_2) + F(\lambda_2)}. \quad (2)$$

Как отмечено в работе [5], спектро-радиометры MERIS и MODIS имеют определенный порог чувствительности, и в этом смысле MODIS значительно чувствителен, чем MERIS (рис. 2).

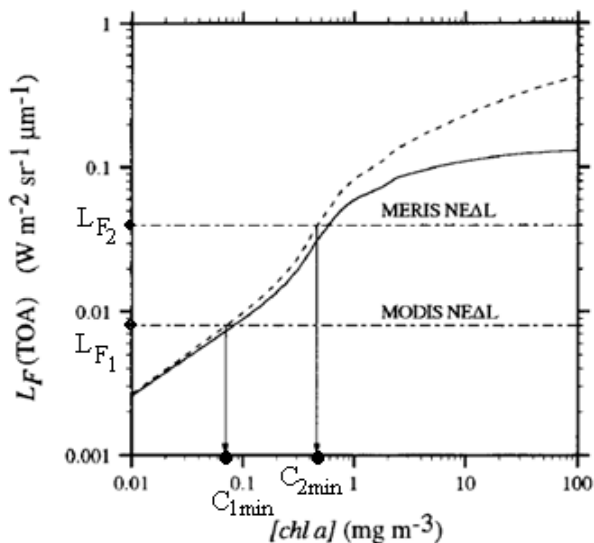


Рис. 2. Изменение интенсивности флуоресцентного излучения на верхней границе атмосферы при фотосинтетически активной радиации (PAR), равной 1000 ммоль·квант·м⁻²·с⁻¹. Также отмечены уровни эквивалентных шумовых сигналов: Для MERIS $L_{F_2} = 0,043 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$. Для MODIS $L_{F_1} = 0,008 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$.

Соответствующие пороговые концентрации Chla отмечены как C_{1min} для MODIS и C_{2min} для MERIS (рис. 2). Приняв во внимание схожесть анализа для спектро-радиометров MODIS и MERIS, анализ проведем для MERIS, затем обобщим полученный результат для MODIS.

С учетом вышеизложенного выражение (2) для максимального и минимального сигнала будет иметь следующие формы записи:

$$C_{Chla,max} = a_{1MOD} \cdot \frac{R(\lambda_1)_{max} + F(\lambda_1)_{max}}{R(\lambda_2)_{max} + F(\lambda_2)_{max}} + b_{1MOD}; \quad (3)$$

$$C_{Chla,min} = a_{1mod} \cdot \frac{R(\lambda_1)_{min} + F(\lambda_1)_{min}}{R(\lambda_2)_{min} + F(\lambda_2)_{min}} + b_{1mod}. \quad (4)$$

Примем следующие обозначения:

$$R(\lambda_2)_{max} = k_1 R(\lambda_1)_{max}; \quad (5)$$

$$F(\lambda_2)_{max} = k_2 F(\lambda_1)_{max}; \quad (6)$$

$$F(\lambda_1)_{max} = s_1 R(\lambda_1)_{max}; \quad (7)$$

$$F(\lambda_2)_{min} = s_2 R(\lambda_1)_{min}. \quad (8)$$

С учетом выражений (5)-(8) выражение (3) принимает следующий вид:

$$C_{Chla,max} = a_{1mer} \cdot \left(\frac{1 + s_1}{k_1 + k_2 s_1} \right) + b_{1mer}. \quad (9)$$

Также с учетом выражений (5)-(8) выражение (4) принимает вид

$$C_{Chla,min} = a_{1mer} \cdot \left(\frac{1 + s_2}{k_3 + k_4 s_2} \right) + b_{1mer}, \quad (10)$$

где $k_3 = \frac{R(\lambda_2)_{min}}{R(\lambda_1)_{min}}$, $k_4 = \frac{F(\lambda_2)_{min}}{F(\lambda_1)_{min}}$.

Динамический диапазон измеряемых величин C_{chl} определим как

$$\Delta d = C_{Chla,max} - C_{Chla,min} = a_{1mer} \cdot \left(\frac{1 + s_1}{k_1 + k_2 s_1} - \frac{1 + s_2}{k_3 + k_4 s_2} \right). \quad (11)$$

Энтропийную оценку информативности спутниковых измерений Chla определим как

$$E = \log_2 \frac{\Delta d}{C_{2min}} = \log_2 \left[\frac{a_{1mer}}{C_{2min}} \left(\frac{1 + s_1}{k_1 + k_2 s_1} - \frac{1 + s_2}{k_3 + k_4 s_2} \right) \right]. \quad (12)$$

Очевидно, что величина E для спектро-радиометров MERIS и MODIS должны получиться разными из-за различий в длинах волн λ_1 и λ_2 , имеющих в этих радиометрах.

Проведем общее модельное вычисление энтропийной оценки информативности результатов измерений хлорофилла a с помощью спектро-радиометра MERIS.

Модельные исследования

Для вычисления показателя E прежде всего определим мультипликативный показатель a_{1mer} . Согласно работе [6], $a_1 = 2,137 \text{ м}^2/\text{м}^3$; согласно [5], $C_{2min} = 0,45 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Далее примем следующие модельные значения: $S_1 = S_2 = 0,05$; $k_1 = 0,3$; $k_2 = 0,3$; $k_3 = 3$; $k_4 = 3$.

В этом случае в соответствии с выражением (12) получаем

$$E = \log_2 \left[\frac{2,137}{0,45} \cdot \left(\frac{1 + 0,05}{0,3 + 0,3 \cdot 0,05} - \frac{1 + 0,05}{3 + 3 \cdot 0,05} \right) \right] =$$

$$= \log_2 [4,7 \cdot 3,17] = \log_2 14,9 \approx 3,7 \text{ дв.ед.}$$

Посмотрим, насколько изменилась бы оценка E в случае неучета флуоресцентного излучения, т.е. при $S_1=S_2 \rightarrow 0$. В этом случае формула (12) принимает следующий вид

$$E = \log_2 \frac{\Delta d}{C_{2 \min}} = \log_2 \left[\frac{a_{1mer}}{C_{2 \min}} \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_3} \right) \right]. \quad (13)$$

С учетом вышеприведенных модельных значений a_{1mer} , $C_{2 \min}$, k_1 и k_3 получаем $E=3,6$ дв.ед.

Таким образом, неучет флуоресцентного составляющего сигнала может привести к некоторому сокращению информативности проводимых аэрокосмических измерений концентрации $Chla$ в морской воде.

Заключение

Таким образом, показано, что известные методы спутниковых измерений концентрации хлорофилла в морской воде допускают их совместное использование в проведении двухволновых измерений. Показано, что неучет флуоресцентной составляющей входной радиации спектрорадиометров может несколько уменьшить энтропийную оценку информативности результатов проводимых измерений. Указанный вывод оправдывает усилия разработчиков и исследователей спектрорадиометров в направлении повышения их радиометрической точности.

Библиографический список

1. Lorenzen C.L. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration // *Deep-Sea Research*. – 1966. – Vol. 13. – P. 223-227.
2. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. – 1977. – Vol. 22 (4). – P. 709-722.
3. Neville R.A., Gower J.F.R. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll a fluorescence // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82. – P. 3487-3493.
4. Gower J.F.R., Borstad G. Use of in vivo fluorescence line at 685 nm for remote sensing surveys of surface chlorophyll a. In: J.F.R. Gower (ed.) *Oceanography from Space*. Plenum Press, New York 1981. pp. 329-338.
5. Babin M., Morel A., Gentili B. Remote sensing of sea surface Sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll a fluorescence // *Int. J. Remote Sensing*. – 1996. – Vol. 17 (12). – P. 2417-2448.

6. Kneubuhler M., Frank T., Kellenberger T.W., Pasche N., Schmid M. Mapping chlorophyll-a in lake Kivu with remote sensing methods. Proc. 'Envisat Symposium 2007', Montreux, Switzerland, 23-27. April 2007 (ESA SP-636, July 2007).

7. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Saprygin V., Povazhnyi V. Operational MERIS-based NIR-red algorithm for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – The Azov Sea case study // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 121. – P. 118-124.

References

1. Lorenzen C.L. A method for the continuous measurement of in vivo chlorophyll concentration // *Deep-Sea Research*. – 1966. – Vol. 13. – P. 223-227.
2. Morel A., Prieur L. Analysis of variations in ocean color. *Limnology and Oceanography*. – 1977. – Vol. 22 (4). – P. 709-722.
3. Neville R.A., Gower J.F.R. Passive remote sensing of phytoplankton via chlorophyll a fluorescence // *Journal of Geophysical Research*. – 1977. – Vol. 82. – P. 3487-3493.
4. Gower J.F.R., Borstad G. Use of in vivo fluorescence line at 685 nm for remote sensing surveys of surface chlorophyll a. In: J.F.R. Gower (ed.) *Oceanography from Space*. Plenum Press, New York 1981. pp. 329-338.
5. Babin M., Morel A., Gentili B. Remote sensing of sea surface Sun-induced chlorophyll fluorescence: consequences of natural variations in the optical characteristics of phytoplankton and the quantum yield of chlorophyll a fluorescence // *Int. J. Remote Sensing*. – 1996. – Vol. 17 (12). – P. 2417-2448.
6. Kneubuhler M., Frank T., Kellenberger T.W., Pasche N., Schmid M. Mapping chlorophyll-a in lake Kivu with remote sensing methods. Proc. 'Envisat Symposium 2007', Montreux, Switzerland, 23-27. April 2007 (ESA SP-636, July 2007).
7. Moses W.J., Gitelson A.A., Berdnikov S., Saprygin V., Povazhnyi V. Operational MERIS-based NIR-red algorithm for estimating chlorophyll-a concentrations in coastal waters – The Azov Sea case study // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 121. – P. 118-124.