



DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2016.4.5>

УДК 504.054

ББК 20.18

ДИСТАНЦИОННАЯ ОЦЕНКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОДНЫХ БАССЕЙНАХ

Махира Магомед гызы Байрамова

Аспирант, научный сотрудник,
Национальное аэрокосмическое агентство
bairamovamm@rambler.ru
ул. С.С. Ахундова, 1, AZ 1106 г. Баку, Республика Азербайджан

Фахрадин Гюльфан оглы Агаев

Доктор технических наук, профессор,
директор института космических исследований природных ресурсов,
Национальное аэрокосмическое агентство
Directoraf@mail.ru
ул. С.С. Ахундова, 1, AZ 1106 г. Баку, Республика Азербайджан

Камал Хейрадин оглы Исмаилов

Доктор технических наук, профессор кафедры аэрокосмического мониторинга,
Национальная академия авиации
kamalismaylov@mail.ru
ул. Бина, 25-й км, AZ 1125 г. Баку, Республика Азербайджан

Натиг Гаджи оглы Джавадов

Доктор технических наук, профессор, генеральный директор ПО «Промавтоматика»
javadovng@mail.ru
ул. Сафаралнева, 18, AZ 1132 г. Баку, Республика Азербайджан

Аннотация. В настоящее время значительная часть земного населения расположена в береговых зонах морей, океанов и озер. Антропогенное воздействие на различные водобассейны в этих населенных зонах оказывает отрицательное влияние на функции местных экосистем, что требует оперативной оценки их состояния. Одним из эффективных методов мониторинга состояния экосистем является дистанционное зондирование. Следует отметить, что степень загрязнения водоемов Chla может достигать $(9 \div 10) \cdot 10^3$ мг/м³, что обуславливает появление ряда специфических явлений, таких как насыщение и большой разброс измеряемых параметров. В работе предлагается простой и эффективный способ оценки концентрации Chla с использованием эффекта смещения по длине волны максимума отражательного спектра в диапазоне $\lambda \approx 700$ нм. Согласно проведенному анализу с точки зрения достижения высокого значения относительной чувствительности наиболее целесообразным участком является участок насыщения характеристики при позиции максимума $P \approx 715$ нм, $P < 715$ нм, где как чувствительность, так и относительная чувствительность предлагаемого способа определения концентрации Chla имеют высокое значение.

Ключевые слова: хлорофилл, дистанционное зондирование, чувствительность, водобассейны, загрязнение.

Как отмечается в работе [9], более чем 50 % всего земного населения расположено в береговых зонах морей, океанов и озер. Бесконтрольное использование воды в этих населенных зонах оказывает отрицательное влияние на функции местных экосистем, что диктует необходимость оперативной оценки состояния водобассейнов, подвергнувшихся влиянию антропогенного фактора. Одним из эффективных методов мониторинга состояния экосистем является дистанционное зондирование. Следует отметить, что в работах [3; 4; 7; 10; 12] были проведены исследования отражательных характеристик водоемов, загрязненных хлорофиллом *a* в концентрациях от 3 до 180 мг/м³. Было обнаружено, что отражательный спектр загрязненных хлорофиллом вод содержит впадину с минимумом на длине волны 670 нм и максимумом на длине волны 700 нм. Этот максимум образуется в результате совместного действия абсорбций водорослей, неорганических взвешенных частиц и воды.

Как было показано в работах [3; 14], при увеличении концентрации Chla указанный максимум смещается в сторону длинных волн. При этом величина указанного максимума зависит от концентрации Chla, но в то же время изменяется под влиянием эффектов обратного рассеяния и поглощения другими компонентами.

Для определения концентрации Chla с использованием отражательных спектров разработан ряд способов. К ним можно отнести

оценку отношения $\frac{R_{\max}}{R_{670}}$, где R_{\max} – значение максимального сигнала на длине волны ≈ 700 нм; R_{670} – величина отраженного сигнала на длине волны 670 нм [3; 5]; оценку отношения $\frac{R_{704}}{R_{672}}$ [8].

В дальнейшем в ряде работ (см., например, [13]) была обнаружена значительная зависимость коэффициента поглощения хлорофилла *a* от физиологического состояния и структуры скопления фитопланктонов. Для ослабления такого влияния при оценке концентрации Chla в работах [6; 11] была предложена трехволновая модель вычисления концентрации Chla в виде:

$$C_{\text{Chla}} = \frac{R^{-1}(\lambda_1) - R^{-1}(\lambda_2)}{R(\lambda_3)}. \quad (1)$$

В ряде работ [1; 2] были рассмотрены вопросы оптимального выбора длин волн λ_1 , λ_2 и λ_3 с целью уменьшения погрешности определения концентрации Chla.

Следует отметить, что степень загрязнения водоемов Chla может достигать $(9 \div 10) \cdot 10^3$ мг/м³, что обуславливает появление ряда специфических явлений, таких как насыщение и большой разброс измеряемых параметров. В качестве примера на рисунке 1 показаны спектры отражения с водоемов, содержащих Chla с различными концентрациями.

Целью настоящего исследования является выработка простого и эффективного спо-

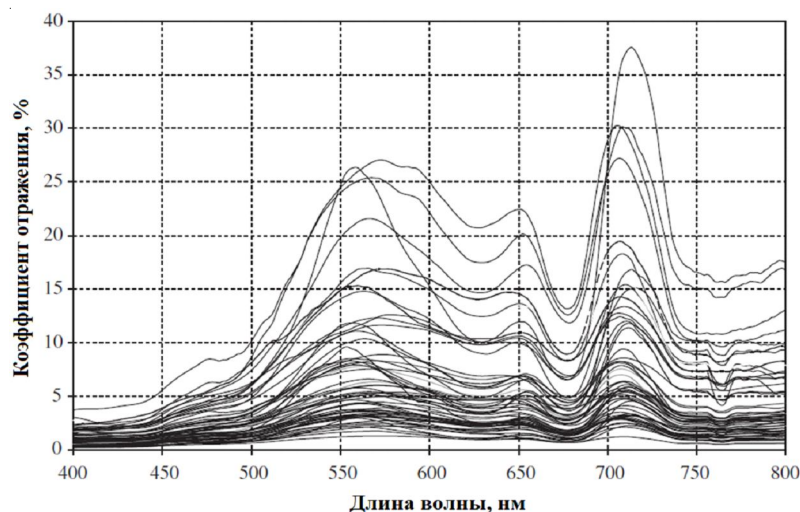


Рис. 1. Спектры отражения водоемов, загрязненных хлорофиллом с различной концентрацией [15]

соба оценки концентрации Chla с использованием эффекта смещения по длине волны максимума отражательного спектра в диапазоне $\lambda \approx 700$ нм.

Предварительно рассмотрим некоторые результаты исследований такого смещения, приведенные в работе [15]. Максимум в отражательном спектре при увеличении концентрации Chla смещается в сторону больших длин волн. Chla имеет значительное поглощение в диапазоне длин волн 690–715 нм, и при увеличении концентрации Chla кривая поглощения становится более широкой, а точка пересечения кривых поглощения Chla и чистой воды смещается в сторону более длинных волн.

Из-за резкого увеличения поглощения чистой воды вблизи длины волны 710 нм происходит насыщение смещения позиции максимума на длине волны 715 нм (см. рис. 2).

Вместе с тем степень корреляции между величиной максимума в спектре отражения и концентрацией Chla достаточно низка

[4; 7], что не позволяет использовать признак амплитуды максимума для оценки концентрации Chla. По указанной причине, как нам представляется, наиболее удобным и простым способом является оценка концентрации Chla по величине смещения позиции указанного максимума.

Подробно остановимся на предлагаемом решении данного вопроса. Отметим, что насыщение характеристики $P = f(\text{Chla})$, где P – позиция пика (нм), показанная на рисунке 2а, позволяет нам с некоторой погрешностью (погрешность аппроксимации не превышает $\pm 7\%$) аппроксимировать эту характеристику экспоненциальной функцией типа

$$P = \Delta\lambda \cdot (1 - e^{-k \cdot \text{Chla}}) \quad (2)$$

где $\Delta\lambda = 715 - 702 = 13$ нм; Chla – концентрация хлорофилла a ; k – постоянная экспоненты, вычисляемая из условия $e^{-k \cdot \text{Chla}} = 0,01$ при $\text{Chla} = 3\,000$ мг/м³.

Из выражения (2) находим:

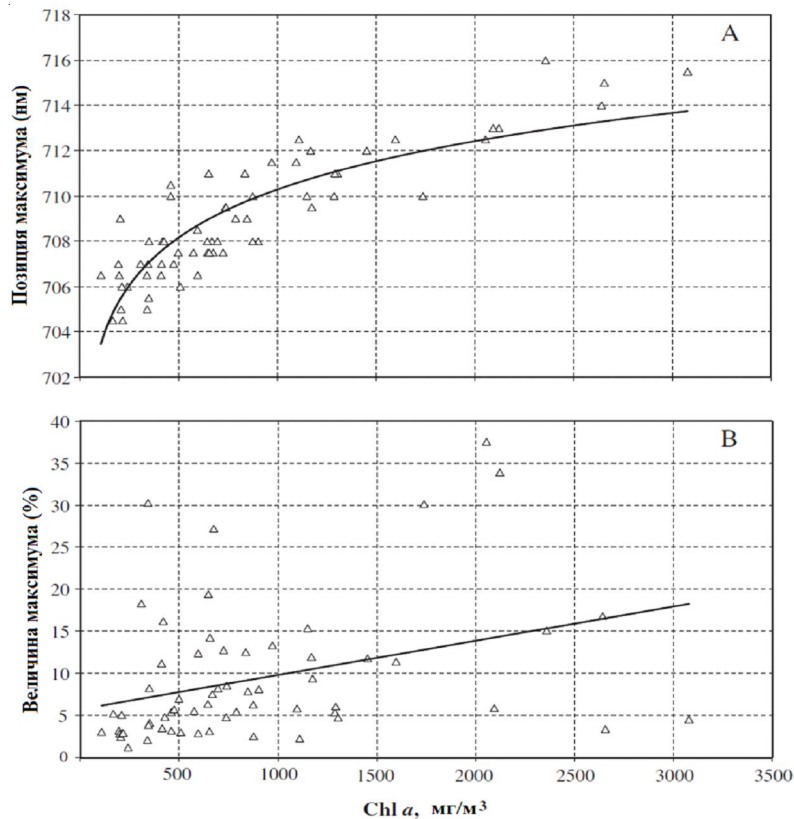


Рис. 2. Насыщение смещения позиции максимума на длине волны 715 нм:

A – зависимость позиции максимума вблизи 700 нм в отражательном спектре от концентрации Chla;

B – зависимость амплитуды максимума вблизи 700 нм от концентрации Chla [15]

$$\text{Chla} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{P}{\Delta\lambda}} \right) \quad (3)$$

Оценим чувствительность определения концентрации хлорофилла по величине P . Имеем:

$$\frac{d(\text{Chla})}{d(P)} = \frac{1}{\Delta\lambda \cdot k \cdot \left(1 - \frac{P}{\Delta\lambda}\right)} \quad (4)$$

Таким образом, с увеличением P чувствительность предлагаемого способа определения Chla растет.

Введем на рассмотрение показатель относительной чувствительности γ , определяемый как:

$$\gamma = \frac{1}{P} \cdot \left[\frac{d(\text{Chla})}{d(P)} \right] \quad (5)$$

С учетом выражений (4) и (5) получим:

$$\gamma = \frac{1}{\Delta\lambda \cdot k \cdot P \left(1 - \frac{P}{\Delta\lambda}\right)} \quad (6)$$

Исследуем выражение (5) на экстремум по методу анализа производных. Имеем:

$$\frac{d\gamma}{dP} = - \frac{\left[\Delta\lambda \cdot k \cdot \left(1 - \frac{P}{\Delta\lambda}\right) - k \cdot P \right]}{\left[\Delta\lambda \cdot k \cdot P \cdot \left(1 - \frac{P}{\Delta\lambda}\right) \right]^2} \quad (7)$$

При $\frac{d\gamma}{dP} = 0$ получим $P = \frac{\Delta\lambda}{2}$.

Таким образом, при экспоненциальной аппроксимации характеристики $P = f(\text{Chla})$ относительная чувствительность способна достигать экстремума при $P = 708,5$ нм.

Для определения характера обнаруженного экстремума вычислим $\frac{d^2\gamma}{dP^2}$. Нетрудно убедиться, что $\frac{d^2\gamma}{dP^2}$ при $P < 715$ нм всегда положительна, то есть показатель относительной чувствительности предлагаемого способа на длине волны 708,5 нм достигает своего минимума.

Таким образом, согласно проведенному анализу с точки зрения достижения высокого значения γ наиболее целесообразным участ-

ком является участок насыщения характеристики $P \approx 715$ нм, $P < 715$ нм, где как чувствительность, так и относительная чувствительность предлагаемого способа определения концентрации Chla имеют высокое значение. Диапазон средних значений концентраций Chla можно считать наиболее неблагоприятным в данном способе, так как при этом относительная чувствительность уменьшается до минимума, а чувствительность определения Chla также относительно невысока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands / G. Dall'Olmo, A. A. Gitelson, D. C. Rundquist, B. Leavitt, T. Barrow, J. C. Holz // Remote Sensing of Environment. – 2005. – № 96 (2). – P. 176–187.
2. Dall'Olmo, G. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters / G. Dall'Olmo, A. A. Gitelson, D. C. Rundquist // Geophys. Res. Lett. – 1938. – № 30 (18). – P. 1938–1941. – DOI: <https://doi.org/10.1029/2003GL018065>.
3. Etude de la qualite des eaux de surface par teledetection / A. Gitelson, A. M. Nikanorov, G. Sabo, F. Szilagyi // IAHS Publications. – 1986. – № 157. – P. 111–121.
4. Gitelson, A. Improving quantitative remote sensing for monitoring of inland water quality / A. Gitelson, F. Szilagyi, K. Mittenzwey // Water Res. – 1993. – № 7. – P. 1185–1194.
5. Gitelson, A. A. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies / A. A. Gitelson, K. Y. Kondratyev // International Journal of Remote Sensing. – 1991. – № 12 (3). – P. 373–385.
6. Gitelson, A. A. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves / A. A. Gitelson, U. Gritz, M. N. Merzlyak // J. Plant. Physiol. – 2003. – № 160. – P. 271–282.
7. Gitelson, A. Signature analysis of reflectance spectra and its application for remote observations of the phytoplankton distribution in Lake Kinneret / A. Gitelson, M. Mayo, Y. Z. Yacobi // Mesures Physiques et Signatures en Télédétection : Actes de Congrès de 6eme Symposium International, 17-21 janvier 1994, Val d'Isere, France. – ISPRS, 1994. – P. 277–283.
8. Gons, H. J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters / H. J. Gons // Environ. Sci. Technol. – 1999. – № 33. – P. 1127–1132.

9. Human domination of Earth's ecosystems / P. M. Vitousek, H. A. Mooney, J. Lubchenco, J. M. Melillo // *Science*. – 1997. – № 277. – P. 494–499.

10. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring inland water quality / A. Gitelson, G. Garbuzov, F. Szilagyi, K.-H. Mittenzwey, A. Karnieli, A. Kaiser // *Int. J. Remote Sensing*. – 1993. – № 14. – P. 1269–1295.

11. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops / A. A. Gitelson, A. Viva, V. Ciganda, D. C. Rundquist, T. J. Arkebauer // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – № 32. – L08403. – DOI: <https://doi.org/10.2929/2005GL022688>.

12. The use of high spectral radiometer data for detection of low chlorophyll concentrations in Lake Kinneret / A. Gitelson, M. Mayo, Y. Z. Yacobi, A. Parparov, T. Berman // *J. Plankton Res.* – 1994. – № 16. – P. 993–1002.

13. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization / A. Bricaud, M. Babin, A. Morel, H. Claustre // *J. Geophys. Res.* – 1995. – № 100. – P. 13,321–13,332.

14. Vos, W. L. On the reflectance spectrum of algae in water: The nature of the peak at 700 nm and its shift with varying concentration / W. L. Vos, M. Donze, H. Bueteveld // *Communication on Sanitary Engineering and Water Management : Technical Report*. – Delft, The Netherlands, 1986. – P. 22–86.

15. Zimba, P. V. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization / P. V. Zimba, A. Gitelson // *Aquaculture*. – 2006. – № 256. – P. 272–286.

REFERENCES

1. Dall'Olmo G., Gitelson A.A., Rundquist D.C., Leavitt B., Barrow T., Holz J.C. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 2005, no. 96 (2), pp. 176–187.

2. Dall'Olmo G., Gitelson A.A., Rundquist D.C. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, no. 30 (18). DOI: [10.1029/2003GL018065](https://doi.org/10.1029/2003GL018065).

3. Gitelson A., Nikanorov A.M., Sabo G., Szilagyi F. Etude de la qualite des eaux de surface par teledetection. *IAHS Publications*, 1986, no. 157, pp. 111–121.

4. Gitelson A., Szilagyi F., Mittenzwey K. Improving quantitative remote sensing for monitoring of inland water quality. *Water Res.*, 1993, no. 7, pp. 1185–1194.

5. Gitelson A.A., Kondratyev K.Y. Optical models of mesotrophic and eutrophic water bodies. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, no. 12 (3), pp. 373–385.

6. Gitelson A.A., Gritz U., Merzlyak M.N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *J. Plant. Physiol.*, 2003, no. 160, pp. 271–282.

7. Gitelson A., Mayo M., Yacobi Y.Z. Signature analysis of reflectance spectra and its application for remote observations of the phytoplankton distribution in Lake Kinneret. *Mesures Physiques et Signatures en Télédétection. ISPRS 6th International Symposium, Val d'Isere, France*, 1994, pp. 277–283.

8. Gons H.J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters. *Environ. Sci. Technol.*, 1999, no. 33, pp. 1127–1132.

9. Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J.M. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 1997, no. 277, pp. 494–499.

10. Gitelson A., Garbuzov G., Szilagyi F., Mittenzwey K.-H., Karnieli A., Kaiser A. Quantitative remote sensing methods for real-time monitoring inland water quality. *Int. J. Remote Sensing*, 1993, no. 14, pp. 1269–1295.

11. Gitelson A.A., Viva A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, no. 32, pp. L08403. DOI: [10.2929/2005GL022688](https://doi.org/10.2929/2005GL022688).

12. Gitelson A., Mayo M., Yacobi Y.Z., Parparov A., Berman T. The use of high spectral radiometer data for detection of low chlorophyll concentrations in Lake Kinneret. *J. Plankton Res.*, 1994, no. 16, pp. 993–1002.

13. Bricaud A., Babin M., Morel A., Claustre H. Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: Analysis and parameterization. *J. Geophys. Res.*, 1995, no. 100, pp. 321–332.

14. Vos W.L., Donze M., Bueteveld H. On the reflectance spectrum of algae in water: The nature of the peak at 700 nm and its shift with varying concentration. *Communication on Sanitary Engineering and water Management, Delft, The Netherlands, Technical Report*, 1986, pp. 22–86.

15. Zimba P.V., Gitelson A. Remote estimation of chlorophyll concentration in hyper-eutrophic aquatic systems: Model tuning and accuracy optimization. *Aquaculture*, 2006, no. 256, pp. 272–286.

DISTANT ASSESSMENT OF CONCENTRATION OF THE CHLOROPHYLL IN THE POLLUTED WATER BASINS

Mahira Magomed gyzy Bairamova

Postgraduate Student, Researcher,
National Aerospace Agency
bairamovamm@rambler.ru
S.S. Akhundova St., 1, AZ 1106 Baku, Republic of Azerbaijan

Fahradin Gulfan ogly Agaev

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Director of Institute of Space Research of Natural Resources,
National Aerospace Agency
Directoraf@mail.ru
S.S. Akhundova St., 1, AZ 1106 Baku, Republic of Azerbaijan

Kamal Hejraddin ogly Ismailov

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Aerospace Monitoring,
National Academy of Aviation
kamalismaylov@mail.ru
Bina St., 25th km, AZ 1125 Baku, Republic of Azerbaijan

Natig Gadjy ogly Djavadov

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Director of PO Promavtomatika Ltd.
javadovng@mail.ru
Safaralneva St., 18, AZ 1132 Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. Now the considerable proportion of the terrestrial population is located in coastal zones of the seas, oceans and lakes. Anthropogenous impact on various water basins in these inhabited zones exerts the negative impact on functions of local ecosystems and demands operational assessment of their state. One of efficient methods of monitoring of a condition of ecosystems is remote sensing. It should be noted that extent of pollution of reservoirs of Chla can reach $(9 \div 10) \cdot 10^3 \text{ mg/m}^3$. It causes emergence of a number of the specific phenomena, such as saturation and wide spacing of gaged parameters. The authors describe an easy and efficient way to assess the concentration of Chla with the use of shift longwise effect of the wave of maximum reflective range of $\lambda \approx 700$ nanometers. According to the carried-out analysis, from the point of view of achievement of high value of the relative sensitivity, the most expedient site is the site in the position of a maximum $P \approx 715$ nanometers; $P < 715$ nanometers. In this case both sensitivity and the relative sensitivity of the offered way of definition of concentration Chla have high value.

Key words: chlorophyll, remote sensing, sensitivity, water basins, pollution.