

**МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА
С КАЛИБРОВКОЙ ПО ОБЩЕМУ СОДЕРЖАНИЮ ФОСФОРА
В ЗАГРЯЗНЕННЫХ ОЗЕРАХ****THE METHOD FOR REMOTE MEASUREMENTS OF TOTAL CHLOROPHYLL CONTENT
WITH CALIBRATION FOR TOTAL PHOSPHORUS IN POLLUTED LAKES**

Ключевые слова: хлорофилл, измерения, оптимизация, регрессия, фосфор, спектрорадиометр.

Явление эвтрофикации неглубоководных водоемов в настоящее время широко исследуют при помощи средств дистанционного зондирования. Моделирование основных качественных показателей неглубоководных водоемов позволяет проводить калибровку и валидацию результатов спутникового зондирования водоемов, подверженных антропогенному загрязнению. Сформулирована и решена задача применения результатов натуральных экспедиционных измерений в целях проверки достоверности данных дистанционного зондирования. Предлагается метод использования результатов измерения общего количества фосфора в воде с помощью спектрофотометра в целях калибровки и валидации результатов двухканальных дистанционных измерений хлорофилла в воде. Изложено математическое обоснование предложенного метода. Для обоснования предлагаемого метода использованы данные, полученные со спутника LANDSAT, для обработки которых используется метод безусловной вариационной оптимизации. Показано, что предлагаемая модификация известного метода позволяет упростить его реализацию, т.к. процедура проведения многоволнового спектрофотометрического измерения хлорофилла в воде заменяется на одноволновое спектрометрическое измерение общего содержания фосфора.

Keywords: chlorophyll, measurements, optimization, regression, phosphorus, spectral radiometer.

The phenomenon of eutrophication in shallow water basins is widely studied at present using the methods of remote sensing. The modeling of major qualitative parameters of shallow water basins allows carrying out calibration and validation of the results of satellite remote sensing of lakes subjected to anthropogenic pollution. This study deals with the objective of utilization of field measurement results with the purpose of remote sensing data verification. It is proposed to use the results of spectrophotometric measurements of total phosphorus content in water for calibration and validation of the results of two-channeled remote measurements of chlorophyll in water. The mathematical substantiation of the proposed method is presented. The LANDSAT satellite measurement data is used for the substantiation. The satellite data is processed using the unconditional variation optimization method. It is shown that the proposed modification of the existing method enables to simplify its realization since the procedure of multi-wavelengths spectrophotometric measurement of chlorophyll in the water is substituted by one wavelength spectrophotometric measurement of total content of phosphorus.

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

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

Введение

Известно, что эвтрофикация водобассейнов тесно связана с увеличением биомассы фитопланктонов [1]. При этом средства дистанционного зондирования позволяют осуществить количественную оценку и моделирование основных качественных показателей неглубоководных водоемов, подверженных антропогенному воздействию.

В настоящее время методы спутникового дистанционного зондирования активно используются для исследования таких показателей загрязнения водобассейнов, как взвешенные осадки и мутность, концентрация хлорофилла, цветные органические растворен-

ные вещества [2]. Для измерения концентрации взвешенных твердых частиц широко используются данные таких спутниковых спектрорадиометров, как MSS, TM, SPOT, а также данные бортовых колориметров и инфракрасных спектрорадиометров [3].

Цветные органические растворенные в воде вещества (водоросли, одноклеточные организмы, содержащие хлорофилл и другие пигменты) могут быть измерены методами регистрации рассеянного излучения от клеток [4, 5]. Концентрация хлорофилла – пигментов фитопланктона, состоящего в основном из хлорофилла *a*, *b* и *c*, может быть определена методами дистанционного зондирова-

ния, в частности путем измерения флуоресцентного излучения хлорофилла под воздействием солнечных лучей [6].

Объекты и методы исследования

Целью исследований является разработка нового метода дистанционного измерения содержания хлорофилла с калибровкой по общему содержанию фосфора в загрязненных озерах. Объектом исследования являются загрязненные озера, предметом исследования – метод дистанционного измерения концентрации хлорофилла. Проанализированы два метода измерения концентрации *Chl*, предложенных разными авторами, осуществлена информационная оптимизация этих методов и показано, как на базе оптимальных режимов функционирования этих методов можно синтезировать новый метод измерения *Chl*, обладающий новым качественным отличием от предыдущих методов.

Результаты и их обсуждение

Вначале рассмотрим первый метод измерения хлорофилла в озерных водах, предложенный в [7]. Согласно этому методу, концентрацию хлорофилла *a* в озерах можно измерить с помощью каналов *B₁* и *B₂* спектрорадиометра, установленного в LANDSAT. Отношение второго (синего канала) к первому (зеленому) каналу хорошо коррелировало с результатами полевых измерений концентрации хлорофилла *a* в озерных водах (рис. 1).

Вкратце рассмотрим возможность информационной оптимизации вышеуказанного метода. Как видно из характера регрессионных линий, приведенных на рисунке 1, имеет место следующее ограничительное соотношение

$$\int_{x_{1min}}^{x_{1max}} y_1(x_1) dx_1 = C_1, \tag{1}$$

где $C_1 = const; x_1 = \frac{B_2}{B_1}$.

Для проведения информационной оптимизации предположим, что проводится серия измерений *Chl_a* в полевых условиях. При этом между количеством проводимых измерений *N* и величиной *x₁* имеется линейная зависимость, а между *N* и концентрацией *Chl_a* – некоторая функциональная зависимость, оптимальный вид которой следует установить. С учетом вышесказанного, а также приняв во внимание критерий оптимизации в виде Шенноновского количества информации, задачу оптимизации математически сформулируем следующим образом: следует вычислить оп-

тимальную функцию *y₁(x₁)*, при которой критерий оптимизации в виде функционала

$$M_1 = \int_{x_{1min}}^{x_{1max}} x_1 \cdot \log_2 [chl_{af}(x_1)] dx_1 \tag{2}$$

достиг бы максимальной величины, где индекс *f* означает проведение полевых измерений.

С учетом выражений (1) и (2) составим полный вариационный функционал, подлежащий оптимизации:

$$M_2 = \int_{x_{1min}}^{x_{1max}} x_1 \cdot \log_2 [chl_{af}(x_1)] dx_1 + \gamma \cdot \int_{x_{1min}}^{x_{1max}} chl_{af}(x_1) dx_1. \tag{3}$$

Отметим, что при решении вышеизложенной задачи оптимизации по методу Эйлера получено следующее выражение

$$\log_2 [chl_{af}(x_1)] = \frac{2C_1 \cdot x_1}{\Delta x_1^2}, \tag{4}$$

где $\Delta x_1 = x_{1max} - x_{1min}$.

Рассмотрим второй метод измерения *Chl a* в озерных водах, предложенный на работе [8]. Метод, предлагаемый в [8], заключается в следующем:

1. С помощью спектрофотометра (модель DR 2800-НАСН°С) определяется общее количество фосфора в воде TP.

2. Вычисляется концентрация *Chl a_c*, используя выражения (5) и (6):

$$\log_{10}(chl_{ac}) = 1,449 \cdot \log_{10}(TP) - 1,136, \tag{5}$$

$$\log_{10}(chl_{ac}) = 1,583 \cdot \log_{10}(TP) - 1,134. \tag{6}$$

Результат вычисления *Chl_{ac}* принимается в качестве наземного валидационного значения *Chl_a*, где индекс *s* означает результат бортовых измерений.

3. Составляются скатерограмма и регрессионные линии зависимости результатов спутниковых измерений *Chl_{RS}* от вычисленных величин $\log_{10}(Chl_{ac})$. Соответствующие графики показаны на рисунке 2.

Проведем информационную оптимизацию этого метода подобно тому, как это было сделано применительно к первому методу.

Как видно из характера линий 1 и 2, представленных на рисунке 2, имеет место следующее ограничительное условие

$$\int_{x_{2min}}^{x_{2max}} y_2(x_2) dx_2 = C_2, \tag{7}$$

где $C_2 = const; x_2 = \log_{10}(chl_{ac}); y_2 = chl_{RS}$.

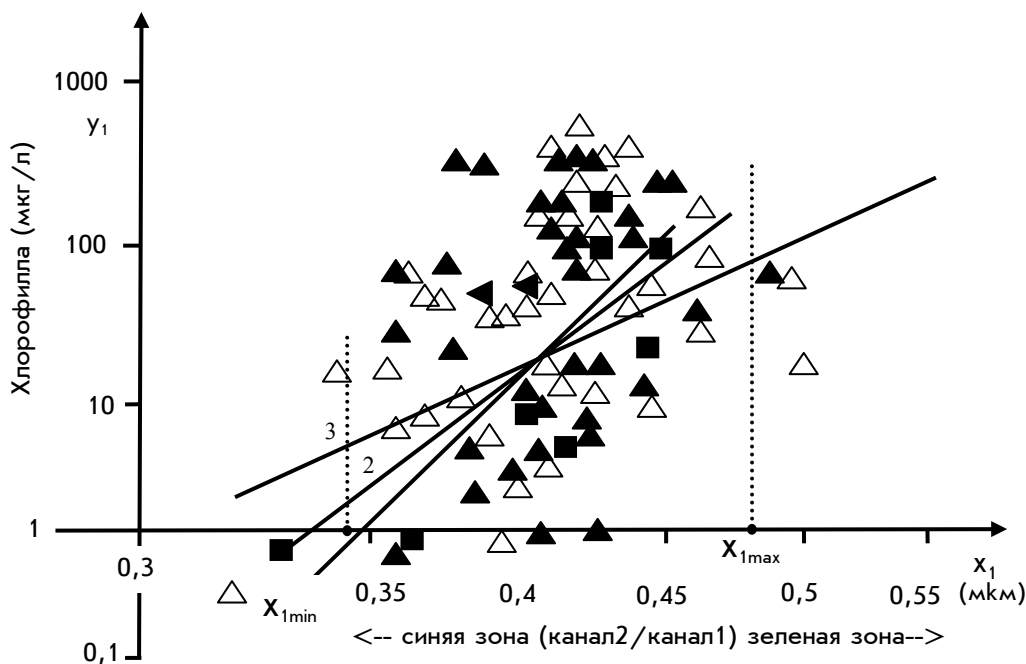


Рис. 1. Скатерограмма и регрессионные линии зависимости результатов полевых измерений Chl_a и бортовых измерений, проведенных спектро радиометром, установленным в Landsat в качестве отношения сигнала канала B_2 к B_1 ; 1 – регрессионная линия между данными, взятыми в тот же день; 2 – с данными, взятыми с интервалом 2 дня; 3 – с данными, взятыми с интервалом 10 дней

Аналогично выражению (2) критерий оптимизации в данном случае имеет вид

$$M_2 = \int_{x_{2min}}^{x_{2max}} x_2 \cdot \log_2 [chl_{RS}(x_2)] dx_2 \cdot (8)$$

С учетом выражений (7) и (8) составляется полный вариационный функционал в виде

$$M_4 = \int_{x_{2min}}^{x_{2max}} x_2 \cdot \log_2 [chl_{RS}(x_2)] dx_2 + \int_{x_{2min}}^{x_{2max}} y_2(x_2) dx_2 \cdot (9)$$

Решение второй оптимизационной задачи по методу Эйлера дало следующее выражение

$$\log_2 [chl_{RS}(x_2)] = \frac{2C_2 \cdot x_2}{\Delta x_2^2}, \quad (10)$$

где $\Delta x_2 = x_{2max} - x_{2min}$.

Для синтеза предлагаемого нового метода определения Chl_a достаточно провести совместный анализ полученных выражений (4) и (10). Разумно предположить, что результат полевых калибровочных измерений

$\log_2 [chl_{af}(x_1)]$ при условии проведения

измерений в идентичных условиях будет хорошо совпадать с результатами спутниковых измерений $\log_2 [chl_{RS}(x_2)]$, т.е. имеет место равенство

$$chl_{af}(x_1) = chl_{RS}(x_2). \quad (11)$$

В этом случае, исходя из выражений (4), (10) и (11), получим

$$\frac{2C_1 \cdot x_1}{\Delta x_1^2} = \frac{2C_2 \cdot x_2}{\Delta x_2^2} \quad (12)$$

или

$$\frac{C_1 \cdot B_2}{B_1 \cdot \Delta(B_2 / B_1)^2} = \frac{C_2 \cdot \log_{10}(chl_{ac})}{\Delta \log_{10}(chl_{ac})^2} \cdot (13)$$

Из выражения (13) окончательно получим искомое выражение, позволяющее проводить калибровочную процедуру по предлагаемой методике

$$\frac{B_2}{B_1} = \frac{\Delta \left(\frac{B_2}{B_1} \right) \cdot C_2 \cdot \log_{10}(chl_{ac})}{C_1 \cdot \Delta \log_{10}(chl_{ac})^2} \cdot (14)$$

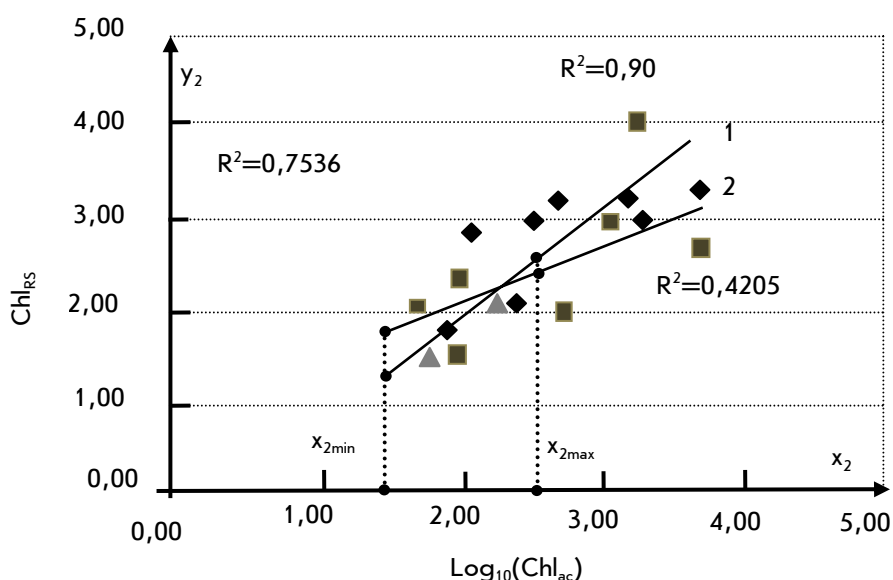


Рис. 2. Скатерограмма и регрессионные линии зависимости Chl_{rs} от вычисленных величин $\log_{10}(Chl_{ac})$. Цифрами указаны: 1 – с учетом результатов вычисленных по формуле (5); 2 – по формуле (6)

Заключение

Таким образом, как видно из выражения (14), результат измерений Chl_a , полученный при оценке отношения B_2/B_1 , может быть откалиброван по результатам измерения TP с использованием уравнений (5), (6) и (14), при наличии данных о значениях

$$\Delta \left(\frac{B_2}{B_1} \right)^2 ; C_2, C_1 ; \Delta \log_{10}(chl_{ac}) .$$

Отметим, что предлагаемая модификация метода, рассмотренного в работе [7], заключающаяся в использовании результатов измерения общего количества фосфора в воде с помощью спектрофотометра в целях калибровки и валидации результатов двухканальных измерений, позволяет упростить известный метод, т.к. необходимость проведения многоволнового спектрофотометрического измерения хлорофилла в воде заменяется на одноволновое спектрометрическое измерение общего содержания фосфора.

Библиографический список

1. Dumont H., Shabrawy G. Lake Borullus of the Nile Delta: A Short History and Uncertain Future / *Ambio Journal of the Human Environment*. – 2008. – Vol. 36 (8). – P. 677-682.
2. Dewidar Kh., Khedr A.A. Remote Sensing of Water Quality for Burullus Lake, Egypt // *Geocarto International*. – 2005. – Vol. 20 (3). – P. 43-49.
3. Liu Y., Islam M., Gao J. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing // *Progress in Physical Geography*. – 2003. – Vol. 27 (1). – P. 24-43.

4. Quibell G. The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae // *International Journal of Remote Sensing*. – 1991. – Vol. 12 (1). – P. 177-182.

5. Quibell G. Estimating chlorophyll concentrations using upwelling radiance from different freshwater algal genera // *International Journal of Remote Sensing*. – 1992. – Vol. 13 (14). – P. 2611-2621.

6. Fischer J., Kronfeld U. Sun-stimulated chlorophyll fluorescence 1: Influence of oceanic properties // *International Journal of Remote Sensing*. – 1990. – Vol. 11 (12). – P. 2125-2147.

7. Turner D. Remote sensing of chlorophyll a concentrations to support the Deschutes Basin Lake and reservoir TMDLs. Report to EPA for 104b3 grant, component 4. Oregon Department of Environmental Quality. June 2010.

8. Farag H., El-Gamal A. Assessment of Eutrophic Status of Lake Burullus using Remote Sensing // *International Journal of Environmental Science and Engineering (IJESE)*. – 2011. – Vol. 2. – P. 61-74.

References

1. Dumont H., Shabrawy G. Lake Borullus of the Nile Delta: A Short History and Uncertain Future / *Ambio Journal of the Human Environment*. – 2008. – Vol. 36 (8). – P. 677-682.
2. Dewidar Kh., Khedr A.A. Remote Sensing of Water Quality for Burullus Lake, Egypt // *Geocarto International*. – 2005. – Vol. 20 (3). – P. 43-49.
3. Liu Y., Islam M., Gao J. Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing // *Progress in Physical Geography*. – 2003. – Vol. 27 (1). – P. 24-43.

4. Quibell G. The effect of suspended sediment on reflectance from freshwater algae // International Journal of Remote Sensing. – 1991. – Vol. 12 (1). – P. 177-182.

5. Quibell G. Estimating chlorophyll concentrations using upwelling radiance from different freshwater algal genera // International Journal of Remote Sensing. – 1992. – Vol. 13 (14). – P. 2611-2621.

6. Fischer J., Kronfeld U. Sun-stimulated chlorophyll fluorescence 1: Influence of oceanic properties // International Journal of Remote

Sensing. – 1990. – Vol. 11 (12). – P. 2125-2147.

7. Turner D. Remote sensing of chlorophyll a concentrations to support the Deschutes Basin Lake and reservoir TMDLs. Report to EPA for 104b3 grant, component 4. Oregon Department of Environmental Quality. June 2010.

8. Farag H., El-Gamal A. Assessment of Eutrophic Status of Lake Burullus using Remote Sensing // International Journal of Environmental Science and Engineering (IJESE). – 2011. – Vol. 2. – P. 61-74.



УДК 630.5

С.Л. Шевелев
S.L. Shevelev

ФОРМИРОВАНИЕ КОРЫ СОСНЫ КЕДРОВОЙ СИБИРСКОЙ

THE FORMATION OF PINUS SIBIRICA BARK

Ключевые слова: сосна кедровая сибирская, ствол дерева, кора ствола, математическая модель, модельное дерево.

Установлены закономерности формирования коры стволов сосны кедровой сибирской. Кора, формирующаяся на стволах, не только влияет на их форму, но и является одним из факторов, оказывающих влияние на сортиментную и товарную структуры древостоев. Объектом исследования являлись древостои сосны кедровой сибирской в Приангарском лесном районе. Цель работы – установление особенностей формирования коры на различных участках стволов для совершенствования методик построения и уточнения ряда таксационных нормативов. Сбор данных осуществлялся методом закладки пробных площадей. Были заложены три пробные площади, на которых срублены и обмерены 104 модельных дерева. Проанализированы и сопоставлены данные по объему коры сосны кедровой сибирской, полученные из шести источников, проведена их отборка. Для анализа особенностей формирования коры в различных частях древесных стволов были исчислены величины «коэффициента коры», определяемого как отношение диаметра ствола без коры к диаметру ствола в коре. Найдены средние значения «коэффициента коры» на различных относительных высотах стволов, соответствующих десятым долям высоты ствола. Эти данные послужили основой для получения математической модели, позволяющей прогнозировать величину «коэффициента коры» на отдельных участках стволов различного диаметра. Рассчитана вспомогательная таблица для получения величины коэффициента. Результаты работы были сопоставлены

с аналогичными характеристиками для стволов лиственницы сибирской. Оказалось, что изменения коэффициента с увеличением диаметра ствола имеют одну тенденцию – увеличение доли древесины и снижение доли коры. В то же время с продвижением по стволу от комля к вершине относительная доля коры в диаметре ствола возрастает. Характер изменения индивидуален для каждой породы.

Keywords: *Pinus sibirica*, tree trunk, trunk bark, mathematical model, model tree.

This study deals with the determination of the regularities of the formation of *Pinus sibirica* trunk bark. The bark being formed on the trunks influences their shapes and is one of the factors effecting the assortment and commodity structure of tree stands. The research targets were the *Pinus sibirica* stands of the Priangarskiy forest area. The research goal was the determination of the formation features of the bark at different trunks parts with the purpose of improving the techniques of development and specification of inventory standards. The data were collected by the technique of sample plots assigning. Three sample plots were assigned; 104 model trees were cut and measured. The data on the bark volume of *Pinus sibirica* obtained from 6 sources were analyzed, compared and culled. To analyze the formation features of bark at different trunk parts, the values of "bark coefficient" were calculated; it was defined as the relation of the trunk diameter without bark to the trunk diameter with bark. The average values of "bark coefficient" at different related trunk heights corresponding to the tenths of the trunk height were determined. These data became the