

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЙ НАЗЕМНО-БОРТОВОЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *a* В МОРСКОЙ ВОДЕ

Б.Л. Джафарова

E-mail: mehdiyeva_69@mail.ru

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

АННОТАЦИЯ: Сформулирована и решена задача создания широкодиапазонного измерителя концентрации хлорофилла *a* в морской воде. Принцип работы комплекса заключается в переходе от бортового метода к лабораторному при дистанционном определении точек, где степень загрязнения превышает определенную пороговую величину. Отмечено, что пороговая величина может быть установлена как по санитарным нормам, так и по требованию достижения эффективной работы комплекса. Представлена общая концепция построения широкодиапазонного наземно-бортового комплекса для определения степени загрязнения морских вод хлорофиллом. Разработан операционный алгоритм функционирования комплекса и проанализированы вопросы его оптимального построения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская вода, хлорофилл, наземно-бортовой комплекс, загрязнение морских вод, фитопланктон, спектральный метод.

Одним из широко используемых методов исследования уровня загрязнения морских вод является контроль цвета морской поверхности. Исследования влияния фитопланктонов на цвет морской воды продолжают уже несколько десятилетий [1]. Известно, что хлорофилл *a*, являющийся основным фотосинтетическим пигментом фитопланктонов, имеет наибольшее поглощение в синей и красной спектральных областях, чем в зеленой [1, 2]. Поглощение микроскопическими морскими растениями, называемыми фитопланктонами, оптической радиации позволяет формировать реальную систему оценки уровня загрязнения морской воды: чем больше фитопланктона в морской воде, тем более зеленой кажется ее цветность.

Исследования степени загрязнения морских вод осуществляются как дистанционно, так и в лабораторных условиях с использованием спектрофотометров для анализа проб морской воды. Наиболее информативным при этом являются длины волны 438 нм, 550 нм и 675 нм [3]. При этом исследуются такие оптические показатели, как поглощение (absorbance) и от-

© Джафарова Б.Л., 2020

ражение (reflectance). Вместе с тем, при дистанционном исследовании морской воды широко используются различные многоволновые индексы, в т. ч. популярный индекс $NDVI$ (нормализованный разностный вегетационный индекс), включая его модифицированный вариант. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Так, бортовой метод измерения путем оценки модифицированного индекса $NDVI_{mod}$ имеет свойство насыщения при значении больше $-0,07$ [4], а лабораторные спектрофотометрические методы трудоемки и требуют значительных затрат.

В данной статье представлена методика совместного наземно-бортового спектрального метода определения концентрации хлорофилла a в морской воде, сочетающего преимущество вышеназванных методов, и рассмотрена возможность его оптимизации.

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Как отмечается в работе [1], для спектрометрических измерений коэффициента абсорбции хлорофилла целесообразно использовать спектральную зону $433-453$ нм, которая соответствует синей зоне спектра. Однако для проведения измерений концентрации хлорофилла предлагается использовать спектральную зону $510-530$ нм, что соответствует зеленой зоне спектра. Вместе с тем, в работе [4], для исследования содержания хлорофилла в воде предлагается показатель, обозначаемый как $NDVI_{mod}$ и определяемый по выражению:

$$NDVI_{mod} = \frac{NIR - B}{NIR + B}, \quad (1)$$

где NIR – сигнал ближнего инфракрасного канала;

B – сигнал синего канала.

Приведена корреляционная модель зависимости концентрации хлорофилла a в воде от величины $NDVI_{mod}$ [4]:

$$Chl_a \text{ (мкг/л)} = 139,37 - 491,01(NDVI_{mod}) - 6751,41(NDVI_{mod}^2) \quad (2)$$

Кривая выражения (2) представлена на рис. 1.

Рассмотрим вторую, наземную составляющую предлагаемого наземно-бортового спектрального метода определения концентрации хлорофилла a в морской воде в соответствии с [3], где исследована возможность определения концентрации Chl_a путем спектрофотометрического измерения таких параметров, как поглощение (absorbance) и отражение (reflectance). На рис. 2 приведена зависимость между концентрацией и поглощением, полученная на длине волны 630 нм, на рис. 3 представлена аналогичная зависимость между концентрацией Chl_a и показателем «отражение» на длине волны 438 нм. Предлагаемый наземно-бортовой метод проведения измерений концентрации Chl_a демонстрирует оптимальное сочетание двух вышеизложенных методик.

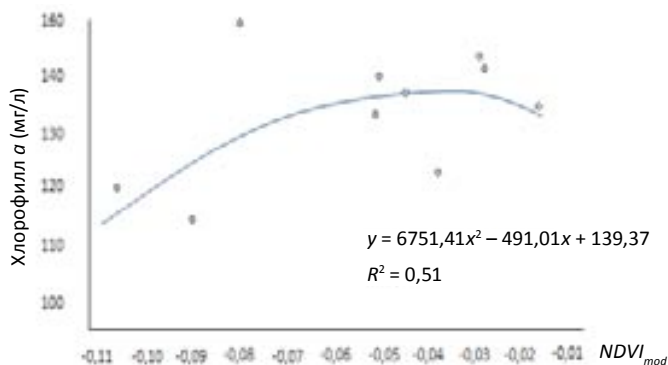


Рис. 1. Кривая корреляционной зависимости концентрации Chl_a от измеренной величины $NDVI_{mod}$ [4].

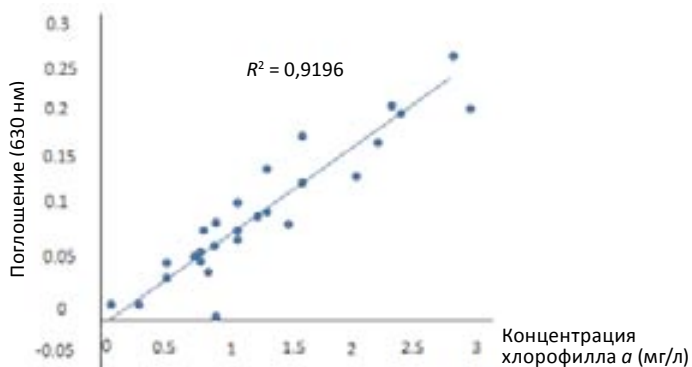


Рис. 2. Корреляционная зависимость между концентрацией Chl_a и показателем «поглощение» на длине волны 630 нм [3].

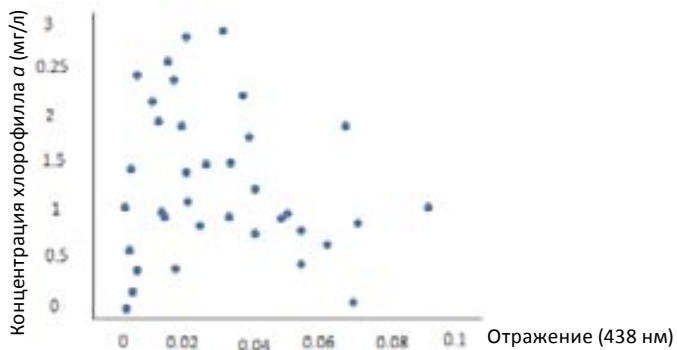
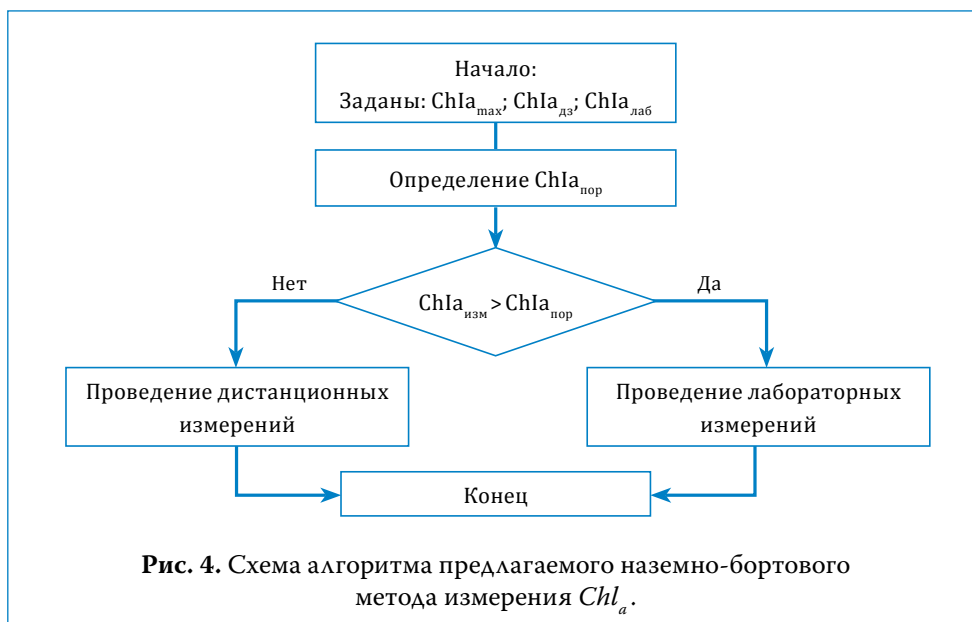


Рис. 3. Корреляционная зависимость между концентрацией Chl_a и показателем «отражение» на длине волны 438 нм [3].

Обобщенный алгоритм предлагаемого наземно-бортового спектрального метода определения концентрации хлорофилла a в морской воде выглядит так:

- Выбор критерия оптимизации метода: заданы ΔChl_{D3} ; $\Delta Chl_{лаб}$; Chl_{max} .
- Определение пороговой величины $Chl_{пор}$, ниже которой следует проводить бортовые измерения.
- Проведение бортовых измерений.
- Проведение лабораторных измерений.

Схема алгоритма предлагаемого метода представлена на рис. 4.



МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПТИМАЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Рассмотрим вопросы оптимального выбора пороговой величины концентрации Chl_a . Оптимальный выбор осуществляется по следующим критериям:

- выбор пороговой величины в соответствии с санитарными нормативами;
- критерий достижения максимума суммарной энтропии проводимых измерений;
- критерий равенства энтропий двух типов проводимых измерений.

В отличие от первого критерия, второй и третий базируются на требовании достижения эффективной работы комплекса. Подробно рассмотрим

процедуру оптимизации выбора пороговой величины Chl_a по двум последним критериям. Рассмотрим определение $Chl_{a,opt}$ по второму критерию: неопределенность определения Chl_a при проведении дистанционных измерений вычислим как:

$$\Delta Chl_{a,\text{д.з}} = [Chl'_a(NDVI_{mod})]_{\text{ср}} \zeta_{NDVI_{mod}}, \quad (3)$$

где $\Delta Chl_{a,\text{д.з}}$ – неопределенность определения Chl_a из-за неопределенности величины $NDVI_{mod}$;

$Chl'_a(NDVI_{mod})$ – производная функциональной зависимости (2), определяемая в виде:

$$Chl'_a(NDVI_{mod})_{\text{ср}} = \frac{d[Chl_a(NDVI_{mod})]}{d(NDVI_{mod})}, \quad (4)$$

где $\zeta_{NDVI_{mod}}$ – среднеквадратичное отклонение $NDVI_{mod}$.

Энтропию дистанционных измерений Chl_a определим по формуле:

$$Ent_{\text{д.з}} = \log_2 \left[\frac{Chl_{a,\text{нор}}}{\Delta Chl_{a,\text{д.з}}} \right], \quad (5)$$

где $\Delta Chl_{a,\text{д.з}}$ – величина кванта дистанционного измерителя.

Энтропию лабораторных измерений Chl_a определим как

$$Ent_{\text{лаб}} = \log_2 \left[\frac{Chl_{a,\text{max}} - Chl_{a,\text{нор}}}{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}} \right]. \quad (6)$$

Критерий F_1 максимума суммы $Ent_{\text{лаб}}$ и $Ent_{\text{д.з}}$ запишем в следующем виде:

$$F_1 = \left[\frac{Chl_{a,\text{нор}}}{\Delta Chl_{a,\text{д.з}}} \right] \cdot \left[\frac{Chl_{a,\text{max}} - Chl_{a,\text{нор}}}{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}} \right] \rightarrow \max. \quad (7)$$

Исследуя F на максимум от $Chl_{\text{нор}}$, получим

$$Chl_{a,\text{нор,opt}} = \frac{Chl_{a,\text{max}}}{2}. \quad (8)$$

При этом отметим, что при решении (8) критерий (7) достигает максимума.

Как следует из выражения (8), $Chl_{a,\text{нор,opt}}$ не зависит от величин $\Delta Chl_{a,\text{лаб}}$ и $\Delta Chl_{a,\text{д.з}}$.

Рассмотрим процедуру определения оптимальной величины $Chl_{a,\text{нор}}$ по критерию равенства энтропий. В соответствии с выражениями (5) и (6), этот критерий математически выражается следующим образом:

$$\frac{Chl_{a, \text{нор}}}{\Delta Chl_{a, \text{д.з.}}} = \frac{Chl_{\text{max}} - Chl_{\text{нор}}}{\Delta Chl_{a, \text{лаб}}}. \quad (9)$$

Из выражения (9) получим

$$Chl_{\text{нор.опт}} = \frac{Chl_{\text{max}}}{1 + \frac{\Delta Chl_{a, \text{лаб}}}{\Delta Chl_{a, \text{д.з.}}}}. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что чем больше отношение $\frac{\Delta Chl_{a, \text{лаб}}}{\Delta Chl_{a, \text{д.з.}}}$, тем меньше $Chl_{\text{нор.опт}}$, что и следовало ожидать. Таким образом, выражения (8) и (10) позволяют определить оптимальные по различным критериям значения $Chl_{\text{нор.опт}}$, что необходимо для построения широкодиапазонных наземно-бортовых комплексов для исследования степени загрязнения различных водоемов.

ВЫВОДЫ

В рамках проведенного исследования разработана общая концепция построения широкодиапазонного измерителя степени загрязнения морских вод хлорофиллом *a*. Общий принцип работы комплекса заключается в дистанционном определении мест, где степень загрязнения превышает определенную пороговую величину. Пороговая величина может быть установлена как по санитарным нормам, так и по требованию достижения эффективной работы комплекса, когда из-за насыщения результатов дистанционных измерений следует переходить на наземно-лабораторный метод измерений.

Научная новизна предлагаемого метода заключается в выработке четких рекомендаций по определению пороговой величины измеряемого показателя, демонстрирующего необходимость перехода в режим наземно-лабораторных измерений. Практическая значимость метода заключается в расширении измеряемого диапазона хлорофилла *a*. Дальнейшая работа в данном направлении возможна путем выработки новых критериев оценки эффективности работы комплекса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Prabu M., Anuncia Margaret S. NDVI generation of Chlorophyll from OCM data for the Indian Ocean region using multispectral images// Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical. September-October 2016. RJPBCS 7(5). P. 2865.
2. John E., Reilly O. Maritorea S., Mitchell Greg B., Siegel A. David. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWIFS// Journal of Geographical Research. October 1998. Vol. 103. P. 24937–24953.
3. Johan B.F., Bin Mat Jafri M.Z., Hwee San L., Wan Omar W.M., Chun Ho T. Chlorophyll *a* concentration of fresh water phytoplankton analysed by algorithmic based spectroscopy// The International Conference of Solid State Science and

Technology (ICSSST 2017). Journal of Physics. Series 1083. 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1083/1/012015.

4. *Guimaraes T.T., Veronez R.M., Koste E.C., Luiz Gonzaga Jr., Bordin F., Inocencio C.L., Larocca C.A., P. de Oliveira M.Z., Vitti D.C., Mauad F.F.* An alternative method of spatial autocorrelation for chlorophyll detection in water bodies using remote sensing// Sustainability. 2017. Vol. 416. No. 9. DOI:10.3390/su9030416.

Для цитирования: Джафарова Б.А. Широкодиапазонный наземно-бортовой спектральный метод определения концентрации хлорофилла а в морской воде // Водное хозяйство России. 2020. № 3. С. 39–50.

Сведения об авторе:

Джафарова Басти Лейсан гызы, диссертант, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика, AZ1115, ул. С.С. Ахундов, 9; e-mail: mehdiyeva_69@mail.ru

WIDE-RANGE GROUND/BOARD-BASED SPECTRAL METHOD FOR DETERMINING THE CHLOROPHYLL *a* CONCENTRATION IN SEAWATER

Basti Leysan gyzy Dzhafarova

E-mail: mehdiyeva_69@mail.ru

National Aero/space Agency, Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract: The article describes solution of the task of developing a wide-range device for measuring the chlorophyll *a* concentration in seawater. The principle of operation is based on remote determination of ranges where the pollution degree exceeds a certain threshold value where the change of regimes is required. The author has noted that the threshold value can be based on both sanitary norms and objectives of the system effective operation. The conducted research resulted in development of the general concept of the wide-range ground/board-based system for determining the degree of seawater pollution with chlorophyll. The author has developed an operational algorithm of the above system functioning and has analyzed the issues of the optimal structuring of the system.

Key words: seawater, chlorophyll, ground/board-based system, concentration, absorbance, reflectance

INTRODUCTION

It is well known that control of the sea surface color is one of the widely used methods of seawater pollution studying. According to [1], researches of the phytoplankton influence on the seawater color go on for several decades. It is common knowledge that chlorophyll *a* as the main photosynthetic pigment of phytoplankton possesses the most absorbance in the blue and red spectral domains in comparison with the green one [1, 2].

The absorbance by microscopic sea plants named optical radiation phytoplankton enables to establish realistic system of the sea pollution degree estimation, as the more phytoplankton in seawater, the more green it seems.

Investigation of the seawater pollution degree can be performed both distantly and in laboratory condition with the use of spectrophotometers for seawater samples analyzing. According to [3], at that, wavelengths of 438 nm, 550 nm and 675 nm are the most informative. This investigates such optical indicators as absorbance and reflectance.

At the same time, in remote investigation of seawater widely uses different multi-wave indices including very popular index *NDVI* (Normalized Differential Vegetation Index), as well as a modified version of this index.

Each of these methods has its advantages and disadvantages. For instance, board-based method of measuring has a shortage due to saturation effect, when the modified index $NDVI_{mod}$ is greater than $-0,07$, while laboratory spectro/photo/metric methods require more labor and relatively more expensive. This article proposes a joint ground/board-based method combining advantages of these methods and considers possibilities of the joint method optimization.

PROPOSED METHOD

As it has been mentioned in [1], it is advisable to use for spectrometric measurements of the chlorophyll adsorption coefficient spectral domain 433–453 nm (which corresponds to the

spectrum blue domain). However, we recommend to use spectral domain 510–530 corresponding to the spectrum green domain for measurements of the chlorophyll concentration.

At the same time, in [4], we propose for studying of the chlorophyll content in water to use the index designated as $NDVI_{mod}$ and determined by the expression

$$NDVI_{mod} = \frac{NIR - B}{NIR + B}, \quad (1)$$

where NIR is the signal of the near infrared canal; B is the signal of blue canal.

In [4] a correlation model of dependency of the chlorophyll *a* concentration in water on the value of $NDVI_{mod}$ is given

$$Chl_a (\text{MKG}/\Lambda) = 139,37 - 491,01(NDVI_{mod}) - 6751,41(NDVI_{mod}^2) \quad (2)$$

The curve of Expression (2) is given in Fig. 1.

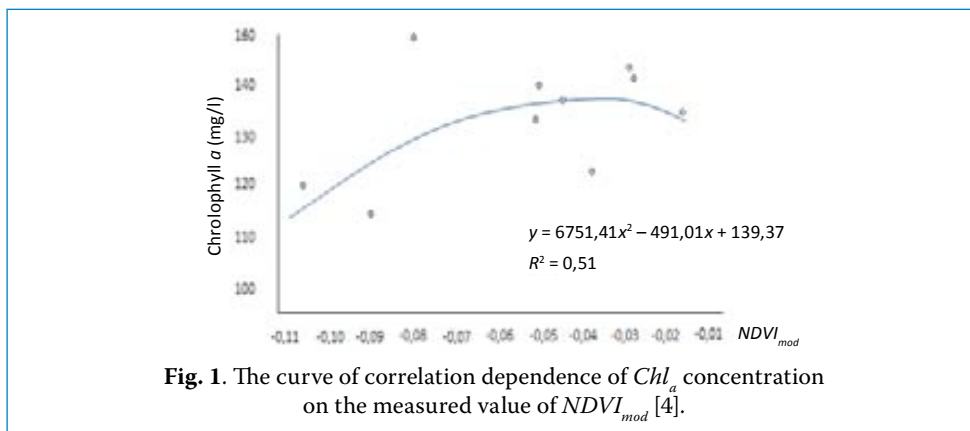


Fig. 1. The curve of correlation dependence of Chl_a concentration on the measured value of $NDVI_{mod}$ [4].

Let us consider in brief the second component of the proposed ground/board-based method.

According to [3], where the possibility of determination of Chl_a concentration in water is studied through measuring such parameters as «absorbance» and «reflectance». Fig. 2 shows dependency between concentration and absorbance, obtained with wavelength 630 nm.

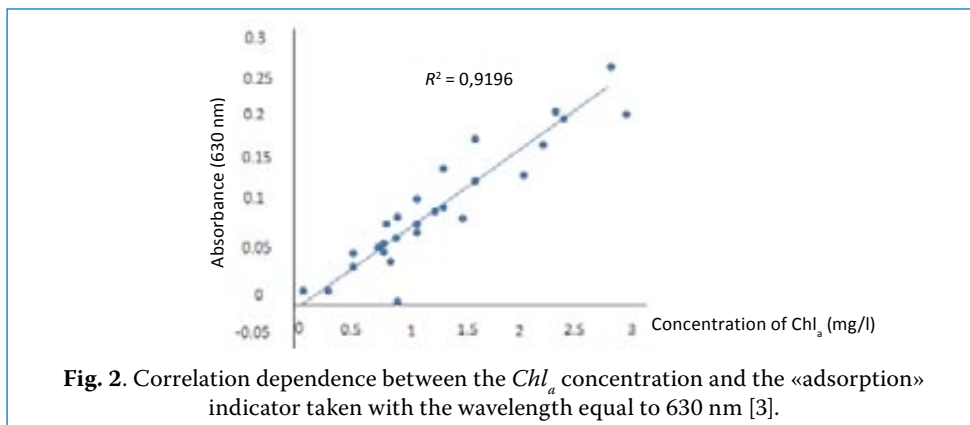


Fig. 2. Correlation dependence between the Chl_a concentration and the «adsorption» indicator taken with the wavelength equal to 630 nm [3].

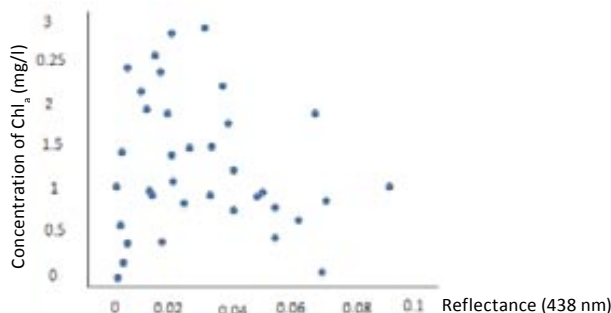


Fig. 3. Correlation dependence between the Chl_a concentration and the «reflection» indicator taken with the wavelength equal to 438 nm [3].

Fig. 3 shows the similar dependency between the Chl_a concentration and the «reflectance» indicator taken with wavelength 438 nm. The proposed ground/board-based method of measuring the Chl_a concentration is the optimal combination of the two above methods.

An integrated algorithm of the proposed method has the following form:

1. Choice of the method optimization criteria. $\Delta Chl_{a_{D3}}$; $\Delta Chl_{a_{\text{лаб}}}$; $Chl_{a_{\text{max}}}$ are preset.

2. Determination of the threshold value $Chl_{a_{\text{ноп}}}$, below which one should carry out board measurements.

3.1 Carrying out board measurements.

3.2 Carrying out laboratory measurements.

Fig. 4 shows the block diagram of the proposed method algorithm.

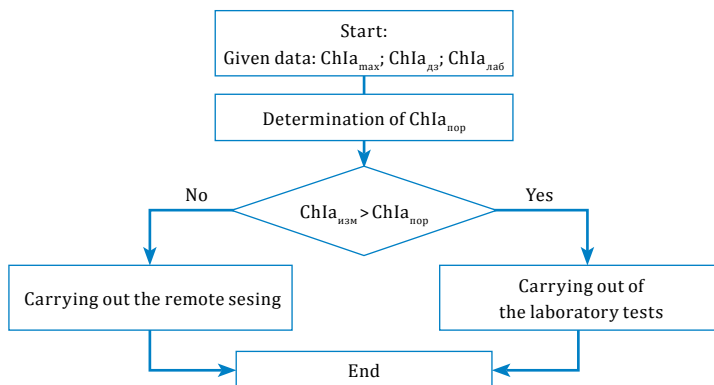


Fig. 4. Block diagram of the algorithm of the proposed ground/board-based method of Chl_a measurement.

MODEL RESEARCHES OF THE PROPOSED METHOD OPTIMAL IMPLEMENTATION

Let us consider the issues of the optimal choice of the concentration threshold value Chl_a . The optimal choice is to be done according to the following criteria:

1. The choice of the threshold value in compliance with the sanitary norms.
2. Criterion of attaining the maximal total entropy of the measurements being done.

3. Criterion of entropy equality of the two types of measurements being done.

In contrast with the first criterion, the second and the third ones are based on the requirement of attaining effective operation of the system. Let us discuss in detail the procedure of the threshold value Chl_a choice optimization by the two latter criteria. Let us consider determination of $Chl_{a,opt}$ in respect of the second criterion.

Uncertainty of the Chl_a determination in the process of remote measurements will be expressed as

$$\Delta Chl_{a,\delta.3} = [Chl'_a(NDVI_{mod})]_{cp} \zeta_{NDVI_{mod}}, \quad (3)$$

where $\Delta Chl_{a,\delta.3}$ is the Chl_a determination uncertainty due to the $NDVI_{mod}$ value uncertainty $Chl'_a(NDVI_{mod})$ is a derivative of the functional dependency (2), determined as

$$Chl'_a(NDVI_{mod})_{cp} = \frac{d[Chl_a(NDVI_{mod})]}{d(NDVI_{mod})}, \quad (4)$$

$\zeta_{NDVI_{mod}}$ is the mean square deviation $NDVI_{mod}$. The remote measurements entropy Chl_a will be determined as

$$Ent_{\delta.3} = \log_2 \left[\frac{Chl_{a,nop}}{\Delta Chl_{a,\delta.3}} \right], \quad (5)$$

where $\Delta Chl_{a,\delta.3}$ is the value of the remote measurer quant. The laboratory measurements entropy Chl_a will be determined as

$$Ent_{\text{лаб}} = \log_2 \left[\frac{Chl_{a,max} - Chl_{a,nop}}{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}} \right]. \quad (6)$$

Criterion F_1 of the sum maximum $Ent_{\text{лаб}}$ and $Ent_{\delta.3}$ will be expressed as following

$$F_1 = \left[\frac{Chl_{a,nop}}{\Delta Chl_{a,\delta.3}} \right] \cdot \left[\frac{Chl_{a,max} - Chl_{a,nop}}{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}} \right] \rightarrow \max. \quad (7)$$

When investigating F for maximum of $Chl_{a,nop}$ we will obtain

$$Chl_{a,nop,opt} = \frac{Chl_{a,max}}{2}. \quad (8)$$

At that, it is possible to show that in case of solution (8) criterion (7) will reach its maximum.

As it is evident from expression (8), $Chl_{a,nop,opt}$ does not depend on the $\Delta Chl_{a,\text{лаб}}$ and $\Delta Chl_{a,\delta.3}$ values.

Let us consider the procedure of determining the $Chl_{a,nop}$ optimal value by the criterion of entropies' equality. In compliance with expressions (5) and (6) this criterion will be expressed as follows:

$$\frac{Chl_{a,nop}}{\Delta Chl_{a,\delta.3}} = \frac{Chl_{a,max} - Chl_{a,nop}}{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}}. \quad (9)$$

From expression (9) we obtain

$$Chl_{a,nop,opt} = \frac{Chl_{a,max}}{1 + \frac{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}}{\Delta Chl_{a,\delta.3}}}. \quad (10)$$

As it is obvious from the obtained expression (10). The greater is the relation $\frac{\Delta Chl_{a,\text{лаб}}}{\Delta Chl_{a,\delta.3}}$, the less is the $Chl_{a,nop,opt}$ that is natural to be expected.

Thus, the obtained expressions (8) and (10) enable to determine optimal (by different criteria) values of $Chl_{a,nop,opt}$ this is necessary for structuring of wide-range ground/board-based systems for studying the degree of various water bodies' pollution.

CONCLUSIONS

Thus, we have formulated and solve the problem of constructing a wide-range measuring system for the degree of seawater pollution with chlorophyll *a*. General logic of the system operation lies in remote determination of places where the pollution degree exceeds the certain threshold value. It has been demonstrated that the said threshold value can be preset according both the sanitary norms and the requirement of attaining the system effective operation.

In conclusion, we formulate the main outputs of the conducted research:

1. We have developed the general concept of construction for the wide-range ground/board-based system for determining of the degree of seawater pollution with chlorophyll.
2. We have developed an operational algorithm of the developed system functioning.
3. We have analyzed the issues of the system optimal structuring.

About the author:

Basti Leysan gyzy Dzhafarova, Post-graduate Student, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan; e-mail: mehdiyeva_09@mail.ru

For citation: *Basti Leysan gyzy Dzhafarova. Wide-range Ground/board-based Spectral Method for Determining the Chlorophyll a Concentration in Seawater // Water Sector of Russia. 2020. No. 3. P. 39–50.*

REFERENCES

1. *Prabu M., Anouncia Margret S.* NDVI generation of Chlorophyll from OCM data for the Indian Ocean region using multispectral images // *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical.* September-October 2016. RJPBCS 7(5). Pp. 2865.
2. *John E., Reilly O. Maritorena S., Mitchell Greg B., Siegel A. David.* Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS// *Journal of Geographical Research.* October 1998. Vol. 103. Pp. 24937–24953.
3. *Johan B.F., Bin Mat Jafri M.Z., Hwee San L., Wan Omar W.M., Chun Ho T.* Chlorophyll a concentration of fresh water phytoplankton analysed by algorithmic based spectroscopy// *The International Conference of Solid State Science and Technology (ICSSST 2017). Journal of Physics. Series 1083.* 2018. DOI:10.1088/1742-6596/1083/1/012015.
4. *Guimaraes T.T., Veronez R.M., Koste E.C., Luiz Gonzaga Jr., Bordin F., Inocencio C.L., Larocca C.A. P., de Oliviera M.Z., Vitti D.C., Mauad F.F.* An alternative method of spatial autocorrelation for chlorophyll detection in water bodies using remote sensing// *Sustainability.* 2017. Vol. 416. No. 9. DOI:10.3390/su 9030416.