

УДК 528.8.04, 528.88
doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-2

МОНИТОРИНГ ФЕНОЛОГИИ РАЗВИТИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПУТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУЦИРОВАННОГО ФЛУОРЕСЦЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА

Ф. Г. Агаев¹, Х. Г. Асадов², М. Э. Омаров³, С. С. Алиева⁴

^{1,2,3,4}Национальное аэрокосмическое агентство, Баку, Азербайджанская Республика
¹director.tekti@mail.ru, ²asadzade@rambler.ru, ³meracomarov@gmail.com, ⁴sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Точное определение фенологического цикла развития растительности важно для повышения эффективности сельскохозяйственных хозяйств. Рассматриваются вопросы осуществления мониторинга фенологии развития растительности в оптимальном режиме. Целью является оптимизация исследования фенологии растительности методом измерений индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла. Объектом исследования является фенология развития растительности. Предметом исследования является метод исследования фенологии растительности, заключающийся в проведении измерений индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла взамен индекса листовой площади LAI (*Leaf Area Index*). *Материалы и методы.* При модельном исследовании среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения кроны солнечное излучение заменено на лазерное, что позволяет избежать отрицательного влияния атмосферных факторов. Для реализации поставленной цели был использован вариационный метод оптимизации. *Результаты.* Проведенная оптимизация позволила определить наихудший вариант модельной зависимости $L = L(\varphi)$, где L – расстояние между лидаром и деревом; φ – квантовый выход флуоресцентного сигнала, который приводит к наименьшей величине измеренного среднеинтегрального значения сигнала флуоресценции. *Выводы.* Рекомендовано не применять данный режим измерений в практике мониторинга фенологии растений с использованием результатов измерения флуоресцентного сигнала излучения хлорофилла.

Ключевые слова: мониторинг, флуоресценция, растительность, измерения, хлорофилл

Для цитирования: Агаев Ф. Г., Асадов Х. Г., Омаров М. Э., Алиева С. С. Мониторинг фенологии развития растительности путем измерения индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 13–19. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-2

MONITORING THE PHENOLOGY OF VEGETATION DEVELOPMENT BY MEASURING INDUCED FLUORESCENT EMISSION OF CHLOROPHYLL

F.G. Agayev¹, H.H. Asadov², M.E. Omarov³, S.S. Aliyeva⁴

^{1,2,3,4}National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan
¹director.tekti@mail.ru, ²asadzade@rambler.ru, ³meracomarov@gmail.com, ⁴sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Abstract. *Background.* Accurate determination of phenological cycle of vegetational growth is essential for increase of effectiveness of agriculture. The issues of monitoring the phenology of vegetation development in an optimal mode are considered. The goal is to optimize the research of vegetation phenology by measuring the induced fluorescence radiation of chlorophyll. The object of the study is the phenology of vegetation development. The subject of the study is the research method for investigating the phenology of vegetation, which consists in measuring the induced fluorescent radiation of chlorophyll instead of the LAI (*Leaf Area Index*). *Materials and methods.* In the model study of the average integral value of the fluorescent radiation of the crown, solar radiation was replaced by laser radiation, which avoids the negative influence of atmospheric factors. The variational method was used to reach the formulated goal. *Results.* The optimization made it possible to determine the worst-case model dependence $L = L(\varphi)$, where L is the distance between the lidar and the tree; φ is the quantum yield of the fluorescent signal, which leads to the smallest value of the measured average integral value of the fluorescence signal. *Conclusion.* It is recommended not to use such a measurement mode in the practice of monitoring plant phenology using the results of measuring the fluorescent signal of chlorophyll radiation.

Keywords: monitoring, fluorescence, vegetation, measurements, chlorophyll

For citation: Agayev F.G., Asadov H.H., Omarov M.E., Aliyeva S.S. Monitoring the phenology of vegetation development by measuring induced fluorescent emission of chlorophyll. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4):13–19. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-2

Введение

Как отмечается в работе [1], общая первичная продукция GPP (Gross Primary Product) всякой растительности в виде биомассы появляется в результате фотосинтеза в масштабе кроны растения. Однако непосредственная точная оценка GPP в масштабах ландшафта или региона является пока нерешенной задачей. Теория Монтиза предлагает определить GPP как функцию поглощенной световой энергии APAR (Absorbed Photosynthetically Active Radiation), умноженную на показатель эффективности использования света (ϵ). Этот показатель характеризует превращение световой энергии в химическую энергию биомассы растительности, т.е. имеем

$$GPP = APAR\epsilon. \quad (1)$$

Однако определение ϵ является трудной задачей, так как этот показатель зависит от физиологических факторов и условий окружающей среды [2, 3]. Следовательно, поиск и разработку новых показателей и моделей, позволяющих осуществить точную оценку GPP, можно считать актуальной задачей. В работах [4–7] была обнаружена высокая степень корреляции между флуоресцентным излучением хлорофилла и фотосинтезом, а также GPP. Подобная корреляционная связь была подтверждена также для масштабных зон и регионов данными, полученными от космических средств дистанционного зондирования (спутники COSAT, GOME-2).

В ряде работ [3, 4] отмечено наличие линейной корреляционной связи между солнечной индуцированной флуоресценцией SIF (Solar Induced Fluorescence), однако в работе [8] утверждается нелинейный характер такой связи.

Для решения данного вопроса, естественно, в первую очередь следует определить метод точного измерения флуоресцентного излучения. Как отмечается в работе [9], было исследовано отношение переменной части флуоресцентного излучения (F_v) к максимальной величине этого излучения (F_m) в зависимости от дня года *DOY* (Day of Year) с помощью следующей функции:

$$\frac{F_v}{F_m} = \frac{[a(DOY - d)^2]}{[b + (DOY - d)^2]} + c, \quad (2)$$

где $\frac{F_v}{F_m}$ – амплитуда изменения; b – показатель сезонных «ям» $\frac{F_v}{F_m}$; d – величина *DOY*, в которой был зарегистрирован минимум $\frac{F_v}{F_m}$.

Однако такой показатель, как выражение (2), согласно работе [9] имеет максимум летом, осенью и зимой, т.е. не связан с показателями фенологии развития растительности. Хорошо известно, что фенологическое развитие растительности хорошо характеризуется такими показателями, как индекс листовой поверхности и количество хлорофилла в листьях. На рис. 1 показаны, соответственно, зависимость SIF от количества хлорофилла в листьях и значения LAI [1].

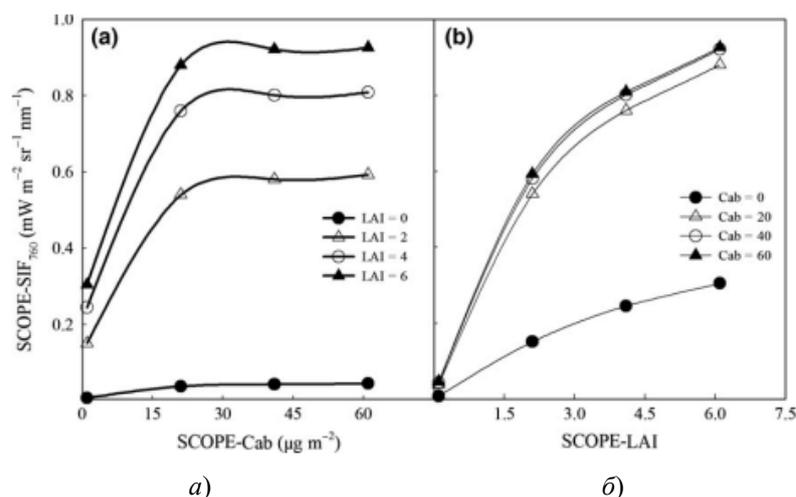


Рис. 1. Графики зависимости SIF от количества хлорофилла в листьях и значения LAI [1]

Используя известные зависимости фенологии растительности от LAI, представленные на рис. 1, и проведя измерения SIF, можно судить о фенологии растительности. Целью настоящей работы является оптимизация исследования фенологии растительности методом измерений индуцированного флуоресцентного излучения хлорофилла и выработка рекомендаций по использованию этого метода.

Материалы и методы

Очевидно, что методика измерения индуцированного флуоресцентного излучения должна быть отработана в условиях неизменности внешнего излучателя, т.е. Солнца. В то же время из-за многочисленных внешних факторов (облака, пыль, дождь и т.д.) достичь постоянства солнечного излучения не удастся и придется проводить исследование на физической модели, заменив солнечное излучение на лазерное излучение определенной длины волны. С этой целью частично воспользуемся результатами работы [10].

Согласно работе [10], для исследования флуоресценции хлорофилла может быть использована лидарная установка на базе лазера, имеющего интенсивность луча на уровне 3 кВт/см^2 . Блок-схема такой установки приведена на рис. 2.

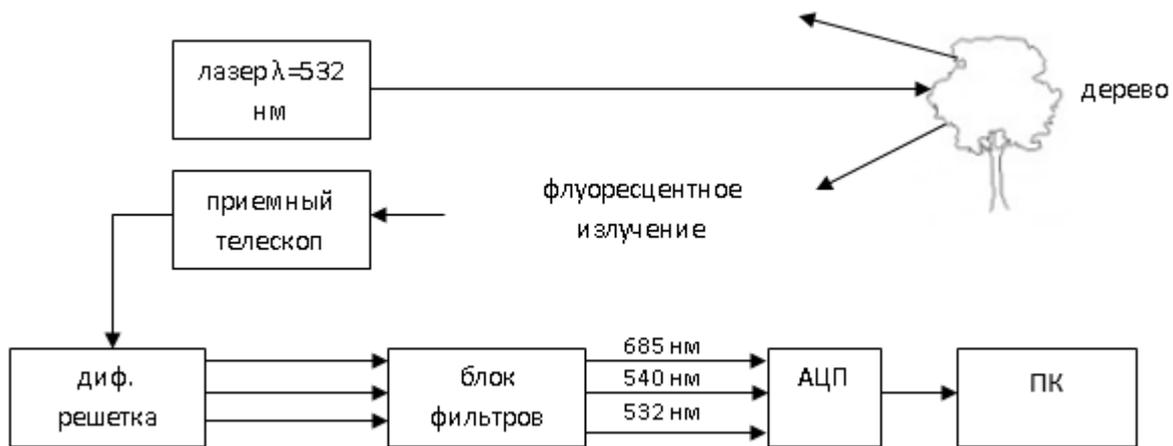


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования флуоресцентного излучения

Согласно работе [10], флуоресцентное излучение хлорофилла на длине волны 685 нм может быть вычислено по следующей формуле:

$$F(685) = c_1 F_0(532) [1 - A(532)] \frac{S}{L^2} \phi T(532) T(685), \quad (3)$$

где $c_1 = \text{const}$; $F_0(532)$ – интенсивность входного излучения; $A(532)$ – альbedo кроны; s – величина апертуры (диафрагмы) приемного объектива; L – расстояние между лидаром и деревом; ϕ – квантовый выход флуоресцентного сигнала; $T(532)$, $T(685)$ – пропускание атмосферы на соответствующих длинах волн.

Отметим, что по сравнению с естественной моделью, включающей солнечное излучение, модель (3) имеет такое преимущество, как возможность учета изменения ϕ во времени, что подтверждается графиком, приведенным на рис. 1,б.

С уменьшением LAI в фенологическом цикле разумно предложить, что происходит уменьшение общего количества хлорофилла, проходящего на поперечное сечение лазерного излучения. Таким образом, применительно к линеаризованной модели этой кривой можно ставить вопрос об измерении среднеинтегральной величины $F(685)$ по формуле

$$F_{\text{с.инт}} = \frac{1}{\phi_{\text{max}}} \int_0^{\phi_{\text{max}}} F(685) d\phi. \quad (4)$$

С учетом выражений (3), (4), а также введя на рассмотрение модельную функцию управления

$$L = L(\varphi), \quad (5)$$

можно ставить задачу исследования $F_{\text{с.инт}}$ на экстремум.

Соответствующий целевой функционал при этом имеет вид

$$F_{\text{с.инт}} = \frac{1}{\varphi_{\text{max}}} \int_0^{\varphi_{\text{max}}} c_1 F_0(532) [1 - A(532)] \frac{S}{L^2(\varphi)} \varphi T(532) T(685) d\varphi. \quad (6)$$

Для решения оптимизационной задачи введем некоторое ограничительное условие на искомую функцию $L(\varphi)$, т.е.:

$$\int_0^{\varphi_{\text{max}}} L(\varphi) d\varphi = C; \quad C = \text{const}. \quad (7)$$

На основе выражений (6) и (7) можно составить следующий целевой функционал F_0 безусловной вариационной оптимизации:

$$F_0 = \int_0^{\varphi_{\text{max}}} \frac{c_2 \varphi}{L^2(\varphi)} d\varphi + \lambda \left[\int_0^{\varphi_{\text{max}}} L(\varphi) d\varphi - C \right], \quad (8)$$

где $c_2 = \frac{c_1 F_0(532) [1 - A(532)] S T(532) T(685)}{\varphi_{\text{max}}}$.

Решение (8) согласно работе [11] должно удовлетворить условию

$$\frac{d \left\{ \frac{c_2 S \varphi}{L^2(\varphi)} + \lambda L(\varphi) \right\}}{dL(\varphi)} = 0. \quad (9)$$

Из условия (9) получаем

$$-\frac{2c_2 S \varphi}{L^3(\varphi)} + \lambda = 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) находим

$$L(\varphi) = \sqrt[3]{\frac{2c_2 S \varphi}{\lambda}}. \quad (11)$$

Вычислим значение множителя Лагранжа. С учетом выражений (7) и (11) получим

$$\int_0^{\varphi_{\text{max}}} \sqrt[3]{\frac{2c_2 S \varphi}{\lambda}} d\varphi = C. \quad (12)$$

Из выражения (12) находим

$$c_3 \int_0^{\varphi_{\text{max}}} \varphi^{\frac{1}{3}} d\varphi = C, \quad (13)$$

где

$$c_3 = \sqrt[3]{\frac{2c_2 S}{\lambda}}. \quad (14)$$

Из формулы (13) получим

$$\frac{3c_3 \varphi_{\text{max}}^{\frac{4}{3}}}{4} = C. \quad (15)$$

С учетом выражений (14) и (15) получим

$$\frac{3}{4} \sqrt[3]{\frac{2c_2 S}{\lambda}} \varphi_{\max}^{\frac{4}{3}} = C. \quad (16)$$

Из выражения (16) находим

$$\frac{2 \cdot 27}{64} \cdot \frac{c_2 S \varphi_{\max}^4}{\lambda} = C^3$$

или

$$\lambda = \frac{2 \cdot 27}{64} \cdot \frac{c_2 S \varphi_{\max}^4}{C^3}. \quad (17)$$

С учетом выражений (10) и (17) получаем

$$L(\varphi) = \sqrt[3]{\frac{\varphi}{\frac{27 \varphi_{\max}^4}{64 C^3}}} = \frac{4 C \sqrt[3]{\varphi}}{3 \varphi_{\max}^{\frac{4}{3}}}. \quad (18)$$

Однако при решении выражения (18) целевой функционал $F_{\text{с.инт}}$ достигает минимума, т.е. производная выражения (9) по искомой функции всегда оказывается положительной величиной.

Следовательно, при реализации условия (18) можно получить минимальную величину измерительного сигнала и, соответственно, минимальное отношение сигнал/шум. В практике исследования фенологии растительности методом измерения флуоресцентного излучения хлорофилла листьев следует учесть, что из-за минимальной информативности условие (18) проведения измерений является нереконструируемым.

Обсуждение

Таким образом, рассмотрена возможность использования флуоресцентного излучения хлорофилла кроны растения для определения фенологической стадии развития растительности. Такая возможность возникает за счет существования однозначной функциональной связи между интенсивностью флуоресцентного излучения и величиной LAI. Для измерения флуоресцентного излучения предлагается использовать лидар на базе лазерного излучения. Замена Солнца на лидарное излучение позволяет исключить погрешности, возникающие из-за нестабильности интенсивности солнечного луча вследствие влияния атмосферных факторов, и определить значение среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения. Проведенная оптимизация среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения позволила определить наихудший результат, т.е. достижение минимальной величины этого показателя. Во избежание такого результата предложено не реализовывать соответствующие условия, при которых возможно появление наименьшей величины среднеинтегрального значения флуоресцентного сигнала.

Заключение

Показано, что фенологическое развитие растительности может быть изучено, используя результаты измерений флуоресцентного излучения кроны.

При модельном исследовании среднеинтегральной величины флуоресцентного излучения кроны замена Солнца на лазерное излучение позволяет избежать отрицательного влияния атмосферных факторов.

Проведенная оптимизация позволила определить наихудший вариант выбора расстояния между сенсором и растительностью, приводящего к наименьшей величине получаемого значения среднеинтегрального сигнала флуоресценции. Рекомендовано избегать данный режим в практике моделирования флуоресцентного сигнала.

Список литературы

1. Yang H., Yang X., Zhang Y. [et al.]. Chlorophyll fluorescence tracks seasonal variations of photosynthesis from leaf to canopy in a temperate forest // Global Change Biology. 2017. P. 2874–2886.

2. Medlyn B. E. Physiological basis of the light use efficiency model // *Tree Physiology*. 1998. Vol. 18. P. 167–176.
3. Frankenberg C., Fisher J. B., Worden J. [et al.]. New global observations of the ter-restrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity // *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. P. 351–365.
4. Guanter L., Dudhia A., Lewis P. E. [et al.]. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements // *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 121. P. 236–256.
5. Guanter L., Zhang Y., Jung M. [et al.]. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014. Vol. 111. P. 1327–1333.
6. Lee J. E., Frankenberg C., van der Tol C. [et al.]. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2013. Vol. 280. P. 176–188.
7. Yang X., Tang J., Mustard J. F. [et al.]. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest // *Geophysical Research Letters*. 2015. Vol. 42. P. 2977–2987.
8. Lee J. E., Berry J. A., Van der Tol C. [et al.]. Simulations of chlorophyll fluorescence in incorporated into the Community Land Model version 4 // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. P. 3469–3477.
9. Van G. D., Smedt S., Valcke R. [et al.]. Seasonal, Diurnal and Vertical Variation of Chlorophyll Fluorescence on *Phyllostachys humilis* in Ireland // *PLoS ONE*. 2013. Vol. 8, № 8. e72145. doi: 10.1371/journal.pone.0072145
10. Matvienko G. G., Grishin A. I., Kharchenko O. V., Romanovskii O. A. Application of laser-induced fluorescence for remote sensing of vegetation // *Optical engineering*. 2006. Vol. 45, № 5. doi: 10.1117/1.2202366
11. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М. : Наука, 1974. С. 432.

References

1. Yang H., Yang X., Zhang Y. et al. Chlorophyll fluorescence tracks seasonal variations of photosynthesis from leaf to canopy in a temperate forest. *Global Change Biology*. 2017;2874–2886.
2. Medlyn B.E. Physiological basis of the light use efficiency model. *Tree Physiology*. 1998;18:167–176.
3. Frankenberg C., Fisher J.B., Worden J. et al. New global observations of the ter-restrial carbon cycle from GOSAT: patterns of plant fluorescence with gross primary productivity. *Geophysical Research Letters*. 2011;38:351–365.
4. Guanter L., Dudhia A., Lewis P.E. et al. Retrieval and global assessment of terrestrial chlorophyll fluorescence from GOSAT space measurements. *Remote Sensing of Environment*. 2012;121:236–256.
5. Guanter L., Zhang Y., Jung M. et al. Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2014;111:1327–1333.
6. Lee J.E., Frankenberg C., van der Tol C. et al. Forest productivity and water stress in Amazonia: observations from GOSAT chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2013;280:176–188.
7. Yang X., Tang J., Mustard J.F. et al. Solar-induced chlorophyll fluorescence that correlates with canopy photosynthesis on diurnal and seasonal scales in a temperate deciduous forest. *Geophysical Research Letters*. 2015;42:2977–2987.
8. Lee J.E., Berry J.A., Van der Tol C. et al. Simulations of chlorophyll fluorescence in incorporated into the Community Land Model version 4. *Global Change Biology*. 2015;21:3469–3477.
9. Van G.D., Smedt S., Valcke R. et al. Seasonal, Diurnal and Vertical Variation of Chlorophyll Fluorescence on *Phyllostachys humilis* in Ireland. *PLoS ONE*. 2013;8(8):e72145. doi: 10.1371/journal.pone.0072145
10. Matvienko G.G., Grishin A.I., Kharchenko O.V., Romanovskii O.A. Application of laser-induced fluorescence for remote sensing of vegetation. *Optical engineering*. 2006;45(5). doi: 10.1117/1.2202366
11. El'sgol'ts L.E. *Differentsial'nye uravneniya i variatsionnoe ischislenie = Differential equations and calculus of variations*. Moscow: Nauka, 1974:432. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Фахраддин Гюльали оглы Агаев

доктор технических наук, профессор,
директор Института космических
исследований природных ресурсов,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: director.tekti@mail.ru

Fakhraddin Gulali oglu Agayev

Doctor of technical sciences, professor,
director of Institute of Space Researches
of Natural Resources,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Хикмет Гамид оглы Асадов

доктор технических наук, профессор,
начальник отдела НИИ
Аэрокосмической информатики,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: asadzade@rambler.ru

Hikmat Hamid oglu Asadov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the department of Research Institute
of Aerospace Informatics,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Мерадж Эльдар оглы Омаров

докторант,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: meracomarov@gmail.com

Meradj Eldar oglu Omarov

Doctoral student,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

Севда Салман гызы Алиева

кандидат технических наук,
начальник отдела,
Институт экологии,
Национальное аэрокосмическое агентство
(Азербайджанская Республика, г. Баку,
ул. С. С. Ахундова, 1)
E-mail: sevdaaliyeva06.01@gmail.com

Sevda Salman gizi Aliyeva

Candidate of technical sciences,
head of the department,
Institute of Ecology,
National Aerospace Agency
(1 S.S. Akhundova street, Baku, Republic of Azerbaijan)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 14.08.2024

Поступила после рецензирования/Revised 09.09.2024

Принята к публикации/Accepted 02.10.2024