

Научная статья

УДК 543.3: 543.635

doi: 10.17223/24135542/40/9

Сезонные изменения состава биогенных органических соединений в водах низинного болота Западной Сибири

**Евгения Борисовна Стрельникова¹, Ирина Владимировна Русских²,
Ольга Викторовна Серебrenникова³**

*^{1, 2, 3} Институт химии нефти Сибирского отделения
Российской академии наук, Томск, Россия*

¹ seb@ipc.tsc.ru

² rus@ipc.tsc.ru

³ ovs49@yahoo.com

Аннотация. Высокая заболоченность территории Западной Сибири (до 70–75%) влияет на химический состав поверхностных и подземных вод. Болота играют важную экологическую и водохозяйственную роль: регулируют паводки и половодья, способствуют естественному самоочищению водных ресурсов от техногенных загрязнений и при этом выступают природными источниками разнообразных органических соединений биогенного и техногенного генезиса. Поэтому актуальной является оценка влияния потенциальных источников на состав и сезонную динамику органических соединений в водах низинного болота, типичного для территории южной тайги Западной Сибири. Торфяная залежь низинного болота Самара, расположенного в Томской области вдали от источников загрязнения, представлена осоковым низинным торфом со степенью разложения 20%. Методика исследований включала ежемесячный отбор проб воды с марта по сентябрь с глубины 30–60 см с помощью торфяного бура. Методом хроматомасс-спектрометрии исследованы состав и содержание алифатических соединений, включающих жирные кислоты, длинноцепочечные эфиры, спирты (алканолы), альдегиды, углеводороды (*n*-алканы), а также изопrenoидных структур – пентациклических тритерпеноидов, тетрациклических стероидов и трициклических дитерпеноидов. Болотная вода в исследованный период характеризуется невысоким содержанием органических соединений (от 3 до 59 мкг/дм³). Минимальное содержание липидов наблюдается в периоды значительного разбавления вод: в апреле–мае, вызванного снеготаянием, и в июле – вследствие обильных дождей. С начала лета в воде преобладают *n*-алканы и жирные кислоты, а в конце периода – длинноцепочечные эфиры. Доля стероидов снижается от 20% (в начале сезона) до 5% (в августе–сентябре). Накопление в болотной воде пентациклических тритерпеноидов происходит в летний период. В первую очередь в воду поступают соединения со скелетом пергидропицена, содержащие среди заместителей макроцикла спиртовую группу. Набор стероидов в водах значительно шире, чем в торфе, где доминируют ситостерол (стигмаст-5-ен-3-ол) и его структурные аналоги (C₂₉). В воде наряду с C₂₉ присутствуют холестерол и его производные, характерные для фитопланктона и животных организмов. Воды богаты отсутствующими в торфе фитостеролами с ненасыщенной связью в положении 7 макроцикла, источниками которых являются различные растения. Поступление отдельных липидных компонентов в воду из залежей торфа и болотных растений зависит

от температурного режима, способствующего или препятствующего развитию болотного фитоценоза и миграции органических соединений в системе торф–вода.

Ключевые слова: болотные воды, торфяная залежь, липиды, химический состав, сезонные изменения

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания ИХН СО РАН (НИОКТР 121031500046-7), финансируемого Министерством науки и высшего образования Российской Федерации. Благодарим Ю.А. Харанжевскую, кандидата геолого-минералогических наук, ведущего научного сотрудника Сибирского НИИ сельского хозяйства и торфа – филиала СФНЦА РАН, за отбор и предоставление образцов.

Для цитирования: Стрельникова Е.Б., Русских И.В., Серебrenникова О.В. Сезонные изменения состава биогенных органических соединений в водах низинного болота Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 40. С. 84–92. doi: 10.17223/24135542/40/9

Original article

doi: 10.17223/24135542/40/9

Seasonal changes in the composition of biogenic organic compounds in the waters of a low-land swamp in Western Siberia

Eugenia B. Strelnikova¹, Irina V. Russkikh², Olga V. Serebrennikova³

*^{1, 2, 3} Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

¹ seb@ipc.tsc.ru

² rus@ipc.tsc.ru

³ ovs49@yahoo.com

Abstract. The high degree of swampiness in Western Siberia (up to 70–75%) influences the chemical composition of surface and groundwater. Swamps play an important ecological and water management role: they regulate floods and high waters, facilitate the natural self-purification of water resources from anthropogenic pollution, and are also natural sources of a variety of organic compounds of biogenic and anthropogenic origin. Therefore, assessing the influence of potential sources on the composition and seasonal dynamics of organic compounds in the waters of a lowland swamp typical of the southern taiga of Western Siberia is relevant. The peat deposit of the Samara lowland swamp, located in the Tomsk region, far from pollution sources, is represented by sedge lowland peat with a decomposition degree of 20%. The research methodology included monthly water sampling from March to September from a depth of 30–60 cm using a peat auger. Chromatography–mass spectrometry was used to study the composition and content of aliphatic compounds, including fatty acids, long-chain esters, alcohols (alkanols), aldehydes, hydrocarbons (n-alkanes), and isoprenoid structures – pentacyclic triterpenoids, tetracyclic steroids, and tricyclic diterpenoids. During the studied period, the bog water was characterized by low organic compound content (from 3 to 59 µg/dm³). The minimum lipid content was observed during periods of significant water dilution: in April–May, caused by snowmelt, and in July, due to heavy rainfall. From early summer, n-alkanes and fatty acids predominated in the water, while

long-chain esters became dominant at the end of the period. The proportion of steroids decreases from 20% (at the beginning of the season) to 5% (in August-September). Pentacyclic triterpenoids accumulate in swamp water during the summer. Compounds with a perhydropicene skeleton containing an alcohol group among the macrocycle substituents are primarily released into the water. The range of steroids in the waters is significantly broader than in peat, where sitosterol (stigmast-5-en-3-ol) and its structural analogs (C29) predominate. Along with C29, cholesterol and its derivatives, characteristic of phytoplankton and animal organisms, are present in the water. The waters are rich in phytosterols with an unsaturated bond at position 7 of the macrocycle, which are absent in peat and are sourced from various plants. The release of individual lipid components into water from peat deposits and bog plants depends on the temperature regime, which facilitates or hinders the development of bog phytocoenosis and the migration of organic compounds in the peat-water system.

Keywords: marsh water, peat deposit, lipids, chemical composition, seasonal changes

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state assignment of IPC SB RAS (R&D 121031500046-7), funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Authors would like to thank Yu.A. Haranzhevskaya, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, a leading researcher at the Siberian Research Institute of Agriculture and Peat – branch of the Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, for selecting and providing samples.

For citation: Strelnikova, E.B., Russkikh, I.V., Serebrennikova, O.V. Seasonal changes in the composition of biogenic organic compounds in the waters of a low-land swamp in Western Siberia. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 40, 84–92. doi: 10.17223/24135542/40/9

Введение

Западная Сибирь является одним из самых заболоченных регионов мира, поэтому проблема качества природных вод здесь стоит весьма остро. В зависимости от условий водно-минерального питания болота подразделяют на низинные (эвтрофные) и верховые (олиготрофные) [1]. Первые расположены в поймах рек, по берегам озер, в местах выхода ключей, в низких местах и получают богатое водно-минеральное питание в основном за счет грунтовых вод. Верховые болота расположены обычно на плоских водоразделах, питаются только за счет атмосферных осадков, в которых очень мало минеральных веществ. Характер питания определяет тип растительности на болоте. Условия формирования болотных вод находятся в тесной взаимосвязи с процессами трансформации растительных остатков и накоплением торфа, вследствие чего болотные воды содержат целый ряд специфических компонентов. Источником органического вещества болотных вод могут служить и техногенные продукты, в том числе нефтяные углеводороды, попадающие в болотные воды в местах добычи и транспортировки нефти, а также воздушным путем. В течение года в результате снеготаяния, выпадения атмосферных осадков, цветения растений и других процессов происходят изменения химического состава вод, как было показано для вод

верхового Бакчарского болота [2]. Цель данной работы – оценка влияния потенциальных источников на состав и сезонную динамику органических соединений в водах низинного болота, типичного для территории южной тайги Западной Сибири.

Объекты и методы исследования

Отбор проб болотных вод проводили в марте–сентябре 2016 г. на болоте Самара (56°55'16,0", 82°30'26,74"), расположенном в Бакчарском районе Томской области, на 1-й надпойменной террасе р. Бакчар, вдали от источников загрязнения. Торфяная залежь на данном участке представлена осоковым низинным торфом со степенью разложения 20%. Методика исследований включала отбор проб воды с помощью торфяного бура с глубины 30–60 см; рН воды = 6,7. Органические вещества (липиды) экстрагировали из болотных вод 10%-ным раствором гексана в хлороформе, исследования проводили с использованием магнитного хроматомасс-спектрометра DFS. Условия проведения анализа приведены в работе [2].

Результаты

В составе биогенных органических соединений болотных вод присутствуют представители алифатических соединений, включающие жирные кислоты (ЖК), длинноцепочечные эфиры (ДЦЭ), спирты (алканола), альдегиды и углеводороды (*n*-алканы), а также изопреноидные структуры – пентациклические тритерпеноиды (ПЦТ), тетрациклические стероиды (СТ) и трициклические дитерпеноиды (ДТ). Суммарное содержание идентифицированных соединений и количество атмосферных осадков, выпавших за период наблюдения, представлены на рис. 1.

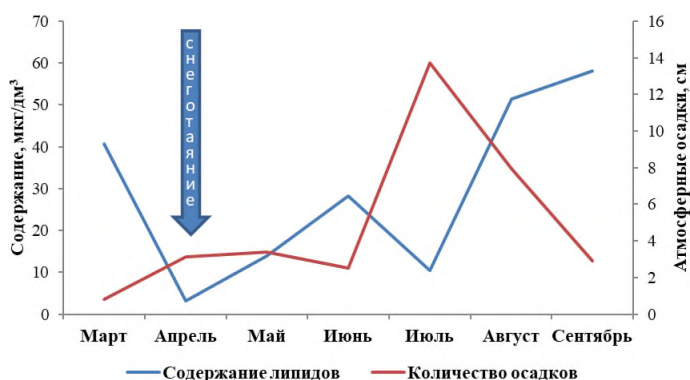


Рис. 1. Содержание липидов в болотных водах и количество осадков в период с марта по сентябрь

Максимальное содержание органических соединений в водах низинного болота приходится на сентябрь (конец вегетационного периода), минимальное

зафиксировано в апреле–мае и июле – в периоды, когда наблюдалось значительное разбавление вод, вызванное соответственно снеготаянием и обильными ливнями.

Распределение отдельных групп идентифицированных соединений в водах низинного болота отличается в разные периоды вегетационного цикла (рис. 2). В целом в водах низинного болота преобладают алифатические структуры (*n*-алканы и ЖК – в апреле–июне, ДЦЭ – в марте и августе–сентябре), доля стероидов, составляющая до 20% в начале сезона, снижается до 5% в августе–сентябре, а ПЦТ на протяжении всего исследованного периода присутствуют в водах в довольно низкой концентрации. Еще ниже доля дитерпеноидов (до 0,6%).

Результаты исследования *n*-алканов низинного болота с высокой степенью вероятности свидетельствуют о биогенном источнике этих соединений, их состав типичен для торфов и болотных растений региона [3]: они представлены гомологами C_{15} – C_{33} с преобладанием нечетных структур C_{23} – C_{31} (с максимумом на C_{27}). Их максимальное относительное содержание в воде приходится на период активного таяния обогащенного *n*-алканами снегового покрова (см. рис. 2). Распределение отдельных биомолекул алифатических структур – *n*-алканов, ЖК, ДЦЭ, алканолов, альдегидов – не имеет существенных отличий в течение всего периода наблюдений. По-другому ведут себя циклические представители биомолекул. От месяца к месяцу в болотной воде меняется как набор, так и соотношение концентраций отдельных циклических соединений.

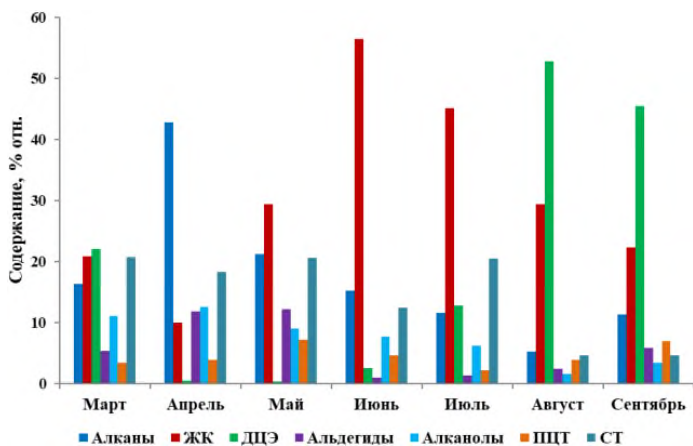


Рис. 2. Распределение органических соединений в воде низинного болота в период март–сентябрь

В марте, когда поверхность болота еще покрыта льдом, все присутствующие в воде ПЦТ представлены только соединениями, характерными для залегающего в этом болоте торфа. Но в воде отсутствуют представители гопенов – УВ, продуцируемых бактериями [4] и вносящих существенный вклад в состав ПЦТ торфа. Гопены появляются в воде в апреле, несмотря на

снижение общей концентрации ПЦТ. С июня по сентябрь концентрация в воде гопенов и УВ со скелетом пергидропицена постепенно повышается. Представители ПЦТ пергидропицевого строения, содержащие в своей структуре спиртовую и карбонильную группы, составляют основную массу ПЦТ в марте (96,7%). Резкое снижение доли этих соединений (до 55,3%) начинается в августе и продолжается в сентябре (до 34,2%). В августе в составе ПЦТ болотных вод появляется редко встречающийся в природе, но выделенный из некоторых экзотических растений [5] ацетат 13,27-циклоурсан-3-ола. Становится заметным количество лупенов. Лупенов нет в торфе, но они присутствуют в высокой концентрации в коре берез [6]. В сентябре содержание лупенов и ацетата 13,27-циклоурсан-3-ола снижается.

Относительное содержание тетрациклических стероидов в болотных водах в марте–августе выше, чем ПЦТ (рис. 3, а), а в сентябре приближается к соотношению этих соединений в торфе, в котором преобладают ПЦТ [3]. В составе стероидов (рис. 3, б) в воде, как и в торфе, доминирует ситостерол (стигмаст-5-ен-3-ол) и его структурные аналоги (C₂₉). Но наряду с характерными для торфа представителями стероидов их набор в водах значительно шире. Так, стероиды C₂₇, характерные для животных организмов и фитопланктона и редко встречающиеся в высших растениях, в торфе представлены единственным соединением – холестан-3-оном, в водах они включают также холестеноны, холестанолы и холестерол (холест-5-ен-3-ол), среди которых холестерол преобладает во всех водах. В отличие от торфа, все воды, за исключением июньской, богаты отсутствующими в торфе фитостеролами с ненасыщенной связью в положении 7 макроцикла. Это шоттенол (стигмаст-7-ен-3-ол), лофенол (стигмаста-7,24(28)-диен-3-ол, 4-метил) и спинастерол (стигмаста-7,22-диен-3-ол). Среди этих фитостеролов в июне преобладает шоттенол, в сентябре – лофенол, в остальные месяцы – спинастерол.

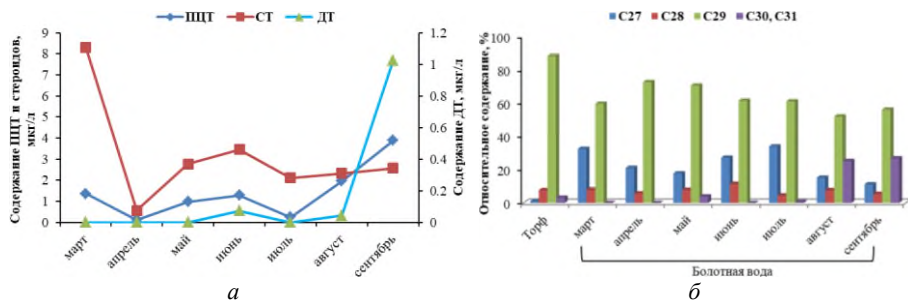


Рис. 3 Содержание циклических биомолекул (а) и вклад отдельных групп в состав стероидов (б)

В качестве источника спинастерола описаны листья шпината, плоды огурца, семена тыквы и др. [7]. Источником лофенола, присутствующего в водах августа–сентября, могут быть обогащенные им листья картофеля, а наличие шоттенола описано, например, для масел семян тыквы и расторопши пятнистой [8]. Ланостерол (C₃₀), циклоартенол (C₃₁) и 24-метилен-

циклоартан-3-он (C_{31}) не обнаружены в торфе, но присутствуют в августовской и сентябрьской воде. Вычленив их вероятный источник не представляется возможным вследствие их широкого распространения в различных растениях.

Трициклические дитерпеноиды, отсутствующие в торфе, зафиксированы в невысокой концентрации в болотных водах с максимумом в сентябре (см. рис. 3, а). Все их представители являются производными смоляных кислот, которые вырабатываются хвойными деревьями.

Выводы

Липидные компоненты в водах низинного болота Самара представлены широким набором биогенных органических соединений, состав и содержание которых подвержены значительным сезонным колебаниям. Вода низинного болота в период с марта по сентябрь характеризуется невысоким содержанием органических соединений с преобладанием среди них *n*-алканов и жирных кислот, а в конце периода – длинноцепочечных эфиров. Минимальное содержание липидов зафиксировано в апреле–мае и июле – в периоды, когда наблюдалось значительное разбавление вод, вызванное соответственно снеготаянием и обильными ливнями. Поступление в воду отдельных липидных компонентов определяется наличием в болоте залежи торфа, а также особенностями водного и наземного фитоценоза. Таким образом, достоверность данных об уровне содержания органических соединений в водах болот сильно зависит от степени разбавления этих вод атмосферными осадками и, вероятно, от температурного режима, способствующего или препятствующего развитию болотного фитоценоза и миграции органических соединений в системе торф–вода. Игнорирование этих факторов может приводить к ложным выводам об эколого-геохимическом состоянии водных объектов. Поэтому при анализе болотных вод необходимо также исследование потенциальных источников органических соединений – индивидуального состава биомолекул торфа и основных представителей болотного фитоценоза.

Список источников

1. Географический энциклопедический словарь / гл. ред. А.Ф. Трешников. М. : Сов. энцикл., 1988. 432 с.
2. Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Russkikh I.V., Kharanzhevskaya Yu.A., Voistinova E.S. Water Seasonal Dynamics of Organic Compounds Distribution in the Raised Bog of Southern Taiga (Western Siberia) // *Chemistry for Sustainable Development*. 2019. Vol. 27 (1). P. 53–60.
3. Serebrennikova O.V., Russkikh I.V., Strel'nikova E.B., Kharanzhevskaya Yu.A., Fedorov D.V. Composition of the Organic Compounds of Different Peat Types from the Southern Taiga Subzone of Western Siberia // *Solid Fuel Chemistry*. 2023. Vol. 57 (1). P. 21–28.
4. Sáenz J.P., Grosser D., Bradley A.S., Lagny T.J., Lavrynenko O., Broda M., Simons K. Hopanoids as functional analogues of cholesterol in bacterial membranes // *PNAS*. 2015. Vol. 112 (38). P. 11971–11976.
5. Lasekan O., Naidu R.M. Changes in the volatile constituents of the leaves of *Stevia rebaudiana* Bertoni caused by different drying procedures // *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2013. Vol. 11 (3). P. 190–194.

6. Толстикова Г.А., Флехтер О.Б., Шульц Э.Э., Балтина Л.А., Толстикова А.Г. Бетулин и его производные. Химия и биологическая активность // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. № 1. С. 1–30.
7. Majeed M., Ahmad F., Mundkur L., Appian S. Pharmacology of α -spinasterol, a phytosterol with nutraceutical values: A review // *Phytotherapy Research*. 2022. Vol. 36 (10). P. 3681–3690.
8. Khallouki F. et al. Chemical and Biochemical Features of Spinasterol and Schottenol // *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2024. Vol. 1440. P. 45–55.

References

1. *Geograficheskiy entsiklopedicheskiy slovar'* / Gl. red. A.F. Treshnikov [Geographical encyclopedic dictionary / Chief editor A.F. Treshnikov]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1988. 432 p.
2. Serebrennikova O.V., Strelnikova E.B., Russkikh I.V., Kharanzhevskaya Yu.A., Voistinova E.S. Water Seasonal Dynamics of Organic Compounds Distribution in the Raised Bog of Southern Taiga (Western Siberia). *Chemistry for Sustainable Development*. 2019. Vol. 27 (1). P. 53–60.
3. Serebrennikova O.V., Russkikh I.V., Strelnikova E.B., Kharanzhevskaya Yu.A., Fedorov D.V. Composition of the Organic Compounds of Different Peat Types from the Southern Taiga Subzone of Western Siberia. *Solid Fuel Chemistry*. 2023. Vol. 57 (1). P. 21–28.
4. Sáenz J.P., Grosser D., Bradley A.S., Lagny T.J., Lavrynenko O., Broda M., Simons K. Hopanoids as functional analogues of cholesterol in bacterial membranes. *PNAS*. 2015. Vol. 112 (38). P. 11971–11976.
5. Lasekan O., Naidu R.M. Changes in the volatile constituents of the leaves of *Stevia rebaudiana* Bertoni caused by different drying procedures. *Journal of Food Agriculture and Environment*. 2013. Vol. 11 (3). P. 190–194.
6. Tolstikov, G.A., Flekhter, O.B., Shul'ts, E.E., Baltina, L.A., Tolstikov, A.G. Betulin i ego proizvodnye. Khimiya i biologicheskaya aktivnost' [Betulin and its derivatives. Chemistry and biological activity]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya – Chemistry for Sustainable Development*, 2005, No. 1, pp. 1–30.
7. Majeed M., Ahmad F., Mundkur L., Appian S. Pharmacology of α -spinasterol, a phytosterol with nutraceutical values: A review. *Phytotherapy Research*. 2022. Vol. 36 (10). P. 3681–3690.
8. Khallouki F. et al. Chemical and Biochemical Features of Spinasterol and Schottenol. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2024. Vol. 1440. P. 45–55.

Сведения об авторах:

Стрельникова Евгения Борисовна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: seb@ipc.tsc.ru

Русских Ирина Владимировна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: rus@ipc.tsc.ru

Серебренникова Ольга Викторовна – доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующая лабораторией природных превращений нефти Института химии нефти Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: ovs49@yahoo.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Strelnikova Eugenia B. – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: seb@ipc.tsc.ru

Russkikh Irina V. – Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: rus@ipc.tsc.ru, tel. 491-927

Serebrennikova Olga V. – Professor, Doctor of Chemistry, Dr. Sci. (Chemistry), Chief Researcher, Head of the Laboratory of Natural Transformations of Oil, Institute of Petroleum Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ovs49@yahoo.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 10.11.2025; принята к публикации 03.12.2025

The article was submitted 10.11.2025; accepted for publication 03.12.2025