

Оригинальная статья / Original Paper

<https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-68-72>

Возможности изучения криогенного состояния рудных штабелей кучного выщелачивания методами геофизики

Н.Д. Прудецкий , И.И. Саввинов, Л.Л. Федорова, К.О. Соколов, Д.В. Хосоев

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск,
Российская Федерация
 ndprudetskii@mail.ru

Резюме: В статье рассматривается применение геофизических методов, таких как георадиолокация и электротомография, для изучения строения и криогенного состояния горных пород рудного штабеля во время проведения кучного выщелачивания полезного компонента. Приведена методика проведения полевых геофизических исследований каждого метода. Представлены результаты проведенных работ на примере одного из геофизических профилей, показана интерпретация георадиолокационного и геоэлектрического разрезов. На георадиолокационном разрезе выделены два разных типа конфигураций волнового поля, приуроченных к особенностям конструктивного строения рудного штабеля. В геоэлектрическом разрезе показаны слои, имеющие различные значения удельного электрического сопротивления, которые характеризуют криогенное состояние горных пород рудного штабеля на момент проведения геофизических исследований.

В результате георадиолокационных измерений горных пород рудного штабеля установлено, что сухая руда, сухая мерзлая руда и мерзлая руда с влажностью 10% имеют близкие, малоразличимые значения диэлектрической проницаемости. Влажная руда имеет высокое значение диэлектрической проницаемости – 7,4. Это более чем в 2 раза выше других сред, которые были выбраны для измерений. Скорости распространения электромагнитных волн в исследованных состояниях руды имеют практически одинаковые значения. Существенное отличие скорости происходит лишь во влажной руде, в ней она замедляется до 0,110 м/нс.

Ключевые слова: горные породы, рудный штабель, кучное выщелачивание, криогенные процессы, георадиолокация, электrorазведка, геоматериал, сухая руда, сухая мерзлая руда, мерзлая руда

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FWRS-2021-0020, №122011800086-1 ЕГИСУ НИОКР; тема FWRS-2021-0021, ЕГИСУ НИОКР №122011800083-0) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Прудецкий Н.Д., Саввинов И.И., Федорова Л.Л., Соколов К.О., Хосоев Д.В. Возможности изучения криогенного состояния рудных штабелей кучного выщелачивания методами геофизики. *Горная промышленность*. 2025;(4S):68–72. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-68-72>

Prospects for studying the cryogenic state of ore piles in heap leaching using geophysical methods

N.D. Prudetskii , I.I. Savvinov, L.L. Fedorova, K.O. Sokolov, D.V. Hosoev

N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation
 ndprudetskii@mail.ru

Abstract: The article discusses the use of geophysical methods, such as ground-penetrating radar (GPR) and electrical tomography, to study the structure and cryogenic state of the rocks in ore piles during heap leaching of useful components. Methodologies are presented for conducting field geophysical studies using each of the methods. The results of the work performed are presented using one of the geophysical profiles as an example, and interpretations of the ground-penetrating radar and geoelectric sections are shown. Two different types of wave field patterns are identified on the ground-penetrating radar section, which are associated with the structural features of the ore pile. The geoelectric section shows layers with different values of specific electrical resistivity, which characterize the cryogenic state of the rock in the ore pile during the geophysical survey.

As a result of GPR survey of the rocks in the ore pile, it was established that the dry ore, the dry frozen ore, and the frozen ore with the 10% moisture content have similar, barely distinguishable dielectric permeability values. The wet ore is characterized with a high dielectric permeability value of 7.4. This is more than twofold higher than other media selected for measurements. The velocities of electromagnetic wave propagation in the studied ore conditions have practically identical values. A significant difference in the velocity occurs only in wet ore, where it slows down to 0.110 m/ns.

Keywords: rock, ore pile, heap leaching, cryogenic processes, georadar, electrical prospecting, geomaterial, dry ore, dry frozen ore, frozen ore

Acknowledgments: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Topic No. FWRS-2021-0020, № 122011800086-1, EGISU NIOCTR; Topic No.FWRS-2021-0021, EGISU NIOCTR, 122011800083-0) using instruments that belong to the Shared core facilities of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Prudetskii N.D., Savvinov I.I., Fedorova L.L., Sokolov K.O., Hosoev D.V. Prospects for studying the cryogenic state of ore piles in heap leaching using geophysical methods. *Russian Mining Industry*. 2025;(4S):68–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2025-4S-68-72>

Введение

Способ кучного выщелачивания (КВ) металлов (золота, меди, урана и т.д.) применяется в основном для обогащения забалансовых и бедных балансовых руд, заскладированных в отвалах, извлечение из которых полезных компонентов обычными обогатительными или гидрометаллургическими методами нерентабельно [1, с. 161]. Этот способ не требует строительства обогатительных фабрик, относится к высокорентабельным, нашел широкое применение во многих странах, таких как США, Канада, Австралия, ЮАР, КНР, Мексика, Чили и др. [2]. Например, в Австралии внедрение технологии КВ позволило добиться увеличения добычи золота в несколько раз. Сроки окупаемости инвестиций в создание промышленных мощностей по добыче благородных металлов методом КВ чрезвычайно малы, для многих горнорудных компаний не превышают одного года.

Переработка руды КВ включает следующие последовательно выполняемые технологические операции: рудоподготовку, которая в зависимости от содержания благородных металлов, фильтрационных свойств, гранулометрического и минералогического состава сырья может включать: дробление, грохочение, шихтовку глинистых руд, окомкование мелких и тонкодисперсных фракций; выбор и подготовку площадки для размещения рудного штабеля (снятие плодородного слоя и планировка площадки); подготовку гидроизозащитного основания (отсыпка глины, ее уплотнение, укладка полиэтиленовой пленки, отсыпка дренажного слоя); укладку руды в штабель (кучу); установку оборудования и прокладку трубопровода для орошения рудного штабеля цианидосодержащими растворами; собственно выщелачивание полезных компонентов посредством дренажа растворов через кучу; накопление золотосодержащих растворов в емкости и их отстаивание; извлечение полезных компонентов из растворов; нейтрализация цианидов; обезвоживание отработанных рудных штабелей (хвостов выщелачивания); рекультивацию отвалов и нарушенных земель [2].

Несмотря на эффективность процесса КВ в мировой практике промышленное освоение этой технологии на месторождениях Якутии, Забайкалья, Приморья началось в 90-х годах прошлого века. Вслед за двумя опытно-промышленными установками артелью «Саяны» в Хакасии, с начала 2000-х годов последовал пуск ряда более крупных сезонных производств, таких как Покровское в Амурской области, Воронцовское и Светлинское на Урале, Таборное в Якутии, которые успешно работают до сих пор. Очередные пять лет, до середины 2000-х, ознаменовались пуском целого ряда новых проектов по КВ разного масштаба и в различных регионах, а также проработкой вопросов применения КВ в регионах с более суровым климатом и удлинением сезона ведения работ. Разработаны определенные приемы, позволяющие успешно противостоять холодам. В основание штабеля КВ (при наличии вечномерзлых грунтов пло-

щадок) сначала укладываются подушку из крупнообломочного материала, обеспечивающего высокую пористость и повышенные теплоизоляционные свойства, помогающие избегать раннего замерзания растворов. Затем поверх такого слоя укладывается остатальная часть штабеля, каждый слой которого отсыпается несколько мощнее. Как правило, штабель выкладывают больших размеров с тем, чтобы уменьшить влияние суточных изменений температуры и удлинения сезона ведения работ. Укладка штабелей в большинстве случаев в настоящее время производится звеньевыми конвейерами и поворотным телескопическим стакером, применение которых позволяет избежать сегрегации рудного геоматериала и обеспечить хорошую проницаемость штабеля для выщелачивающих растворов.

Таким образом, эффективность процесса выщелачивания руд зависит от температурных условий рудного штабеля и выщелачивающего раствора, что, в свою очередь, обуславливает сезонность работы горнодобывающих предприятий, использующих технологию КВ. Для наблюдения за рудным штабелем требуется применение систем мониторинга, включающих в себя методы контроля и диагностики состояния рудного штабеля. С этой целью в других регионах России применяются методы геофизики [3–5], также имеется опыт применения геофизических методов для решения инженерно-геокриологических задач [6–8], однако в условиях распространения многолетнемерзлых горных пород стандартные методики измерений и интерпретации геофизических данных требуют соответствующей доработки.

В Институте горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского проведены экспериментальные исследования на опытном полигоне участка месторождения «Северный». Полевые инженерно-геофизические работы методами георадиолокации и электротомографии проведены на рудных штабелях в первых числах июля 2024 г.

Материалы и методы

Георадиолокация

Для исследования рудного штабеля использован антенный блок с центральной частотой 100 МГц (НПО «Логис-Геотех», Россия) (рис. 1). Для проведения полевых измерений и сбора данных использован блок управления георадаром, подключенный к антенному блоку. Антенный блок во время съемки находился в контакте с поверхностью рудного штабеля. Для измерения длины профилей и привязки точек зондирований на местности использовался встроенный датчик перемещения с колесом (ДП-32).

Электротомография

Для проведения исследований методом геоэлектрической томографии использовалась многоэлектродная электроразведочная аппаратура (Скала 48К12) (рис. 2). Она объединяет в одном корпусе 12-канальный измеритель



Рис. 1
Исследования на участке
георадаром «ОКО-3»
с антенным блоком
АБ-100М3 (100 МГц)



Рис. 2
Многоэлектродная
электроразведочная
аппаратура Скала 48К12

Fig. 2
The Skala 48K12
multi-electrode electrical
prospecting equipment

и мощный генератор. Аппаратура рассчитана на работу с двумя электроразведочными косами по 24 электрода. Внутренний генератор мощностью 250 Вт (напряжение до 600 В, ток до 2,5 А) обеспечивает необходимую глубинность для решения данной задачи.

В процессе работ использовалась 4-электродная симметричная установка Шлюмберже. Электроразведочные косы раскладывали на профиле по прямой линии. Заземленные электроды подключали к двум косам по 24 шт. на каждую, а косы к станции, которая располагалась в центре профиля. Для электродов использовали титановые стержни длиной 30 см. Шаг между электродами – 2 м, поэтому одна расстановка составляла 96 м. При длине профиля более 96 м применялась схема продолжающего профиля («roll along»). Переходное заземление изменялось от 0,5 до 10 кОм. Напряжение генератора устанавливали в пределах 200–400 В. Длительность импульса тока выбрана равной 80 мс. Значение тока в генераторной линии составляло от 3,5 до 890 мА.

Результаты

На рис. 3 представлены схемы георадиолокационных и электроразведочных профилей, проложенных параллельно друг к другу на поверхности рудного штабеля. Площадь исследования поделена на 2 участка. Профили сориентированы относительно перпендикулярно к выходу раствора из рудного штабеля. На момент проведения геофизических работ система орошения рудного штабеля была остановлена.

По априорным данным на момент проведения геофизических работ высота рудного штабеля участка №1 составляет 14 м. Горные породы штабеля находились под орошением раствором. Для примера интерпретации волнового поля рассмотрен георадиолокационный разрез по профилю ПР2 (рис. 4). На основе ранее проведенных лабораторных работ установлено, что среднее значение диэлектрической проницаемости – основной электрофизический

параметр, определяющий масштаб глубин георадиолокационных разрезов, при увлажненной талой руде составляет по разрезу $\epsilon' = 7,4$. На волновом поле радарограммы прослеживаются хаотичные отражения, связанные с конструктивным строением кучи из кусков измельченной руды, а также протяженные оси синфазности сигналов, отраженных от границ, образованных миграцией раствора в теле рудного штабеля.

Насыщенность раствором горных пород штабеля повлияла на затухание георадиолокационных сигналов по всему профилю на глубине ниже 4–5 м. Таким образом, выявить слой мембранны на глубине 14 м по данным георадиолокации не удалось.

По результатам проведенных геофизических работ методикой электротомографии установлено, что геоэлектрический разрез исследуемых рудных штабелей характеризуется плавно дифференцированным строением. На рис. 5 представлен геоэлектрический разрез по профилю ПР2 участка 1 (см. рис. 3). На данном разрезе отображаются зоны с высокими и низкими значениями кажущегося удельного электрического сопротивления (у.э.с.).

Среди преимуществ методов постоянного тока нужно отметить хорошую разрешающую способность при работах в высокоомных средах, а именно – выделение слабопроводящих объектов на фоне среды с повышенным удельным электрическим сопротивлением (у.э.с.). Известно, что высокими значениями кажущегося у.э.с. характеризуются породы, находящиеся в мерзлом состоянии, низкие значения у.э.с., как правило, присущи талым породам.

Интерпретация геоэлектрических разрезов базировалась на априорной информации, полученной в результате лабораторных исследований на базе Института горного дела Севера СО РАН. По лабораторным данным установлены значения удельного электрического сопротивления талой влажной руды – 402 Ом*м и мерзлой влажной руды – 2740 Ом*м. При сопоставлении результатов выявлено, что породы до отметки в среднем 5–7 м отобража-



Рис. 3
Схема георадиолокационных и
электроразведочных профилей
на поверхности участков
исследований

Fig. 3
Layout of the GPR and
electrical prospecting profiles
on the surface of the surveyed
areas

ются на геоэлектрическом разрезе относительно низкими сопротивлениями ($63\text{--}400 \Omega\text{m}$), т.е. это увлажненные, пропитанные раствором горные породы. От 7 до 10–11 м разрез характеризуется средними значениями – от 400 до $3000 \Omega\text{m}$, что в нашем случае соответствует горным породам, менее насыщенным раствором. Ниже отметки 11 м у.э.с. имеют значения более $3000 \Omega\text{m}$. Если опираться на данные лабораторного эксперимента, то, возможно, что породы у основания кучи находятся в мерзлом состоянии. На глубине 14 м расположена мембрана, которая оказывает изолирующее действие и препятствует распространению электрических токов в грунты основания кучи, находящиеся под мембраной. Следовательно, на геоэлектрическом разрезе представленные значения удельного электрического сопротивления ниже по глубине 14 м являются некорректными.

По результатам совместного анализа данных георадиолокации и электротомографии, полученных в летнее вре-

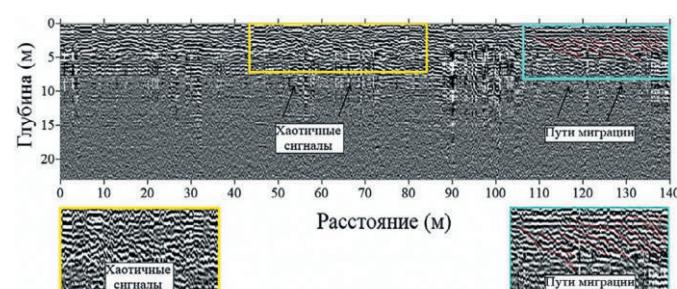


Рис. 4
Георадиолокационный разрез
по профилю ПР2 (м через зап)

Fig. 4
A GPR section along Profile
PR2

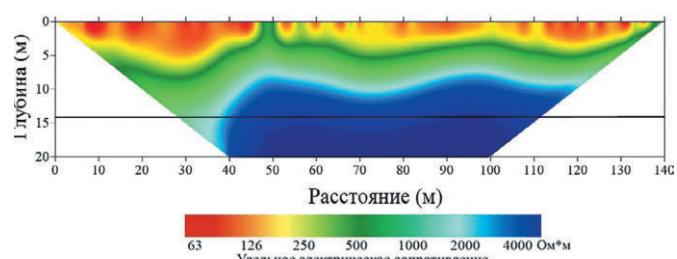


Рис. 5
Геоэлектрический разрез
по профилю №2

Fig. 5
An electrical prospecting
section along Profile 2

мя, выполнена классификация данных электрического сопротивления, по которой выделены типы зон в рудном штабеле: 1) Электрическое сопротивление в диапазоне от 102 до $102,5 \Omega\text{m}$ – **насыщенные** растворами зоны кучи выщелачивания; 2) Электрическое сопротивление в диапазоне от $102,5$ до $103,5 \Omega\text{m}$ – **менее насыщенные** технологическими растворами зоны кучи выщелачивания; 3) Электрическое сопротивление в диапазоне сопротивлений от $103,5$ до 105 – **мерзлые** зоны кучи выщелачивания.

В результате георадиолокационных измерений горных пород рудного штабеля установлено, что сухая руда, сухая мерзлая руда и мерзлая руда с влажностью 10% имеют близкие, малоразличимые значения диэлектрической проницаемости. Влажная руда отличается более чем в 2 раза от вышеуказанных сред высоким значением диэлектрической проницаемости – 7,4. Также и со скоростью распространения электромагнитных волн в руде, для сухой в талом и мерзлом состоянии и влажной в мерзлом состоянии – скорости имеют практически одинаковые значения. Существенное отличие скорости происходит лишь во влажной руде, в ней она замедляется до $0,110 \text{ м/нс}$.

Выходы

Проведенные экспериментальные и натурные исследования показали, что применение георадиолокации позволяет изучать строение кучи (геометрию границ) по отражению электромагнитного сигнала. Оценить криогенное состояние геоматериала, находящегося в штабеле, возможно анализом значений их электрофизических свойств, полученных с помощью электроразведочных наблюдений. Установлено, что по полученным комплексным геофизическим данным можно выделить зоны рудного штабеля, насыщенные раствором, менее насыщенные и мерзлые породы, что позволит в дальнейшем принимать соответствующие технологические решения для хорошей проницаемости раствора по телу рудного штабеля.

Список литературы / References

- Козловский Е.А. (ред.) *Горная энциклопедия*: в 5 т. М.: Советская энциклопедия; 1987. Т. 3. 592 с.
- Кашуба С.Г., Лесков М.И. Кучное выщелачивание в российской практике – обзор опыта и анализ перспектив. *Золото и технология*. 2014;(1):10–14. Режим доступа: https://zolteh.ru/technology_equipment/kuchnoe_vyshchelachivanie_v_rossiyskoy_praktike_obzor_optya_i_analiz_perspektiv/ (дата обращения: 17.12.2024). Kashuba S.G., Leskov M.I. Heap leaching in the Russian practice: a review of experience and analysis of prospects. *Zoloto i Tekhnologii*. 2014;(1):10–14. (In Russ.) Available at: https://zolteh.ru/technology_equipment/kuchnoe_vyshchelachivanie_v_rossiyskoy_praktike_obzor_optya_i_analiz_perspektiv/ (accessed: 17.12.2024).
- Татаринов А.П., Гудков С.С., Дементьев В.Е. Основные аспекты технологии кучного выщелачивания из золотосодержащего сырья. *Золотодобыча*. 2001;(34):41–49. Режим доступа: <https://zolotodb.ru/article/373> (дата обращения: 03.07.2025). Tatarinov A.P., Gudkov S.S., Dementiev V.E. Key aspects of the heap leaching technology for gold-bearing raw materials. *Zolotodobycha*. 2001;(34):41–49. (In Russ.) Available at: <https://zolotodb.ru/article/373> (accessed: 03.07.2025).
- Оленченко В.В., Осипова П.С., Калганов А.С., Чекрыжов А.В. Электротомография рудного штабеля при кучном выщелачивании золота. В кн.: *Инженерная и рудная геофизика 2021: материалы 17-й науч.-практ. конф. и выставки, г. Геленджик, 26–30 апреля 2021 г.* М.: ЕАГЕ ГЕОМОДЕЛЬ; 2021. С. 12. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152019>
- Maghsoudy S., Ardejani F.D., Molson J., Amini M., Ebrahimi L. Application of geo-electrical tomography in coupled hydro-mechanical – chemical investigations in heap leaching. *Mine Water and the Environment*. 2019;38(1):197–212. <https://doi.org/10.1007/s10230-018-0557-6>
- Сясько А.А., Гриб Н.Н., Имаев В.С., Гриб Г.В. Выбор оптимальной методики геофизического контроля целостности гидроизоляции площадок кучного выщелачивания. Известия высших учебных заведений. *Горный журнал*. 2018;(6):41–49. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-41-49>
Sias'ko A.A., Grib N.N., Imaev V.S., Grib G.V. Selecting effective methodology of geophysical control over the heap leaching pad waterproofing integrity. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Gornyy Zhurnal*. 2018;(6):41–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2018-6-41-49>
- Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Оленченко В.В., Проворная И.В., Саева О.П. Оценка современного состояния хвостохранилища золоторудного производства: ценные и токсичные компоненты. *Интерэкспо ГЕО-Сибирь*. 2017;2(4):113–117. Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Olenchenko V.V., Provorina I.V., Saeva O.P. The current state of gold mining tailings: valuable and toxic components. *Interexpo GEO-Siberia*. 2017;2(4):113–117. (In Russ.)
- Великин С.А., Марченко Ю.Л., Бажин К.И. Геофизические исследования при изучении инженерно-геокриологического состояния вмещающих горных пород восточного борта карьера «Нюрбинский» (Западная Якутия). *Вестник Камчатской региональной ассоциации учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле*. 2015;(3):35–46. Velikin S.A., Marchenko Yu.L., Bazhin K.I. Geophysical research during the study of engineering and geocryological state of host rocks in the eastern mine “Nyurba” (Western Yakutia). *Bulletin of Kamchatka Regional Association “Educational-Scientific Center”. Earth Sciences*. 2015;(3):35–46. (In Russ.)

Информация об авторах

Прудецкий Николай Дмитриевич – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: ndprudetskii@mail.ru

Саввинов Иннокентий Иннокентьевич – ведущий инженер, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0005-1256-2689>

Федорова Лариса Лукинична – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Соколов Кирилл Олегович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-4179-9619>

Хосоев Доржо Владимирович – младший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Information about the authors

Nikolai D. Prudetskii – Cand. Sci. (Eng.), Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: ndprudetskii@mail.ru

Innokenty I. Savvinov – Leading Engineer, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0005-1256-2689>

Larisa L. Fedorova – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Kirill O. Sokolov – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-4179-9619>

Dorzho V. Hosoev – Junior Researcher, N.V. Chersky Mining Institute of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Article info

Received: 20.06.2025

Revised: 13.08.2025

Accepted: 20.08.2025

Информация о статье

Поступила в редакцию: 20.06.2025

Поступила после рецензирования: 13.08.2025

Принята к публикации: 20.08.2025