



ГЕОФИЗИКА

Научная статья
УДК 550.379+550.85
EDN: SPMFDZ
DOI: 10.21285/2686-9993-2023-46-3-270-281



Картировочные возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии

Л.Г. Нерадовский^а

^аИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

Резюме. Цель представленного исследования заключалась в рассмотрении возможностей метода геофизики в решении задачи количественной оценки прочности осадочных пород, слагающих основание инженерных сооружений на станции «Кюргеллях», расположенной по Амуро-Якутской железнодорожной магистрали в 572 км от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри (Россия). Решение поставленной задачи было осуществлено методом дистанционного индуктивного зондирования с применением новой технологии изучения процесса затухания в неоднородной анизотропной геологической среде гармонического поля вертикального магнитного диполя на частоте 1,125 и 0,281 МГц в промежуточной зоне разноса 5–100 м. Сравнительный анализ установил согласие в изменении геолого-геофизических оценок средней прочности лабораторных водонасыщенных образцов и прогнозируемого в таком же состоянии массива осадочных пород на сопоставимой глубине 6–12 м. Мера согласия при использовании наиболее адекватного уравнения степенной функции высока и по приведенному значению коэффициента множественной детерминации равна 0,815. Это означает, что среди всех мерзлотно-грунтовых факторов вклад фактора прочности в результат затухания электромагнитного поля на отмеченных частотах и разносе доминирует и составляет не меньше 80 %. Благодаря этому апробированный метод геофизики правильно картирует границы распространения осадочных пород разной прочности. В разной степени ослабленные дробленые и трещиноватые породы с прочностью ниже 40–35 МПа приурочены к разнонаправленным тектоническим разрывным нарушениям, образующим структуру, близкую к полигональной. По данным геофизики, границы структуры четко прорисовываются на глубине 12,3–27,5 м, где доминируют породы прочной категории (50–120 МПа). Метод дистанционного индуктивного зондирования рекомендуется применять на всех стадиях изысканий с целью районирования застраиваемых территорий Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов.

Ключевые слова: станция «Кюргеллях», массив осадочных пород, скально-полускальные грунты, прочность, изыскания, дистанционное индуктивное зондирование, глубина

Финансирование: Работа выполнена по бюджетному финансированию в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова по проекту Сибирского отделения Российской академии наук «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов» (регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9).

Благодарности: Автор выражает благодарность бывшему главному геофизику ОАО «ЮжЯкутТИСИЗ» Г.К. Суворовой за ценные консультации в вопросах производства геофизических работ и ныне покойному геологу АО «ЯкутТИСИЗ» В.Е. Немцевой за отличную документацию керна скважин.

Для цитирования: Нерадовский Л.Г. Картировочные возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии // Науки о Земле и недропользование. 2023. Т. 46. № 3. С. 270–281. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-270-281>. EDN: SPMFDZ.



GEOFYSICS

Original article

Mapping capabilities of geometric EM induction sounding in southern Yakutia permafrost

Leonid G. Neradovskii^a

^aMelnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

Abstract. The purpose of the article is to consider the possibilities of the geophysical method in solving the problem of quantitative estimation of the strength of sedimentary rocks that form the basis of engineering structures at the Kyurgellakh station of the Amur-Yakutsk Railway located 572 km away from the town of Neryungri, which is an administrative center of southern Yakutia (Russia). The problem is solved using the method of geometric electromagnetic induction sounding and a new technique that explored the attenuation of the harmonic field induced by a vertical magnetic dipole in the inhomogeneous anisotropic geological medium at the frequencies of 1.125 and 0.281 MHz in the intermediate separation zone of 5–100 m. A comparative analysis has determined a good agreement in changes of geological and geophysical estimates of the average strength of laboratory water-saturated samples and sedimentary rock mass predicted in the same state at the comparable depth of 6–12 m. The measure of agreement when using the most adequate equation of the power function is high and equals 0.815 according to the normalized coefficient of multiple determination. This means that strength is the most important factor among the frozen ground characteristics affecting the electromagnetic field attenuation at the frequencies and spacing specified, contributing no less than 80 %. The tested geophysical method can thus correctly map the distribution boundaries of different strength sedimentary rocks. The crushed and fissured rocks with the strengths below 40–35 MPa are confined to the tectonic fractures of varying directions with a polygon-like structure. Geophysical data clearly delineate the structure at the depths of 12.3–27.5 m where predominate the rocks with high strengths (50–120 MPa). The geometric EM induction sounding is recommended to use at all stages of geotechnical investigations to map the development areas of southern Yakutia by rock strength classes.

Keywords: Kyurgellakh station, sedimentary rock mass, rocky-semi-rocky soils, strength, exploration, geometric electromagnetic (EM) induction sounding, depth

Funding: This budgetary financed research was performed at the Laboratory of Permafrost Engineering of Melnikov Permafrost Institute within the Basic Research Project of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences “Sustainability of Natural and Engineering Systems in Permafrost Regions and Development of New Technologies for Using Permafrost Resources (Reg. ID AAAA-A20-120111690011-9).

Acknowledgements: The author is grateful to G.K. Suvorova, the former Chief Geophysicist at OAO “YuzhYakutTISIZ” for her valuable consultations on the geophysical works operation and to the late V.E. Nemtseva, the Geologist at AO “YakutTISIZ” for the perfect geological logging of borehole cores.

For citation: Neradovskii L.G. Mapping capabilities of geometric EM induction sounding in southern Yakutia permafrost. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2023;46(3):270-281. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2023-46-3-270-281>. EDN: SPMFDZ.

Введение

Известно, что результаты применения в геологии методов геофизики оцениваются в первую очередь визуально по относительной пространственной (площади, глубине) или временной изменчивости исследуемых характеристик. Затем начинается обработка фактического материала математическими методами. Цель настоящего исследования заключалась в иллюстрации картировочных возможностей редко применяемого в настоящее время метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) на примере решения за-

дачи вероятностной оценки прочности мерзлых скально-полускальных грунтов. Решение такого типа задач методами геофизики настолько востребовано в современной реальности, что известный исследователь Южной Якутии Н.Н. Гриб отнес их к важнейшим задачам геомеханики [1]. Результат решения представленной задачи показан в сравнении геолого-геофизических изображений динамики прочности мерзлых осадочных пород на одном из объектов инженерно-строительных изысканий Южной Якутии. Со стороны геологии сравнивалось изображение изменчивости



прочности, построенное по данным буровых и лабораторных работ, а со стороны геофизики – аналогичное изображение, построенное по данным ДИЗ с применением технологии изучения затухания гармонического высокочастотного поля вертикального магнитного диполя (ВВМД) [2]. Эта инновационная технология не применялась ни в России, ни за рубежом. Категоричность такого заявления рождена в результате многолетнего поиска и анализа публикаций в разных источниках¹. Начиная с 60-х гг. прошлого века в них не было найдено ни одного даже поверхностного упоминания метода ДИЗ, изучавшего затухание поля ВВМД. Перечислим авторитетные источники. Среди них выделим работы выдающегося ленинградского ученого-геофизика А.В. Вешева. К ним прибавим работу украинского геофизика М.И. Задериголовы [3], обзорную работу красноярских геофизиков В.И. Иголкина и др. [4], информацию с сайта Института геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН². Отдельно выделим работу сотрудника этого института В.А. Давыдова³ [5]. Наконец, остановимся в изучении источников на документе высокого государственного статуса – инструкции по электроразведке Министерства геологии СССР.

Зарубежный опыт применения ДИЗ в числе других методов индуктивной геоэлектрики с общим названием ЕМІ (*англ.*: electromagnetic induction) мало в чем отличается от отечественного опыта. Объединяет этот интернациональный опыт полное молчание о применении технологии изучения затухания поля ВВМД. Начиная с конца 70-х гг. прошлого века зарубежные геофизики изучали и по сей день продолжают изучать в килогерцовом диапазоне частот электропроводимость почвогрунтов и пород, чаще всего с аппаратурой ЕМ-31

и ЕМ-38 [6]. О приверженности к классическому подходу изучения электропроводимости методами ЕМІ пишут Дж.А. Дулиттл, Э.К. Бревик [7]. Лишь в отдельных ранних работах, например в работе А. Сарторелли, Р. Френча [8] и техническом отчете департамента транспорта и госучреждений штата Аляска⁴ со ссылкой на работу Дж.Д. Макнила, обращено внимание на затухание как на суммарный индуктивный отклик от слоев нижнего полупространства. Однако сделано это опять же в контексте изучения электропроводимости без прямого изучения затухания низкочастотных полей в неоднородной анизотропной геологической среде.

Материалы и методы исследования

Геомеханические исследования выполнены в ретроспективном порядке по данным инженерно-геологических изысканий, полученным в 1990–1991 гг. на площадке проектируемого поселка станции «Кюргеллях». Станция расположена по Амуро-Якутской железнодорожной магистрали в 572 км от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри на северо-восток в сторону столицы Республики Саха (Якутия) г. Якутска. Геоморфологически станция находится на водоразделе руч. Орто-Тала и Аччыгый-Тала на высоте 513–529 м. На станции пробурено 25 скважин до глубины 10–12 м. По данным буровых работ, основание станции сложено мерзлыми нижнекембрийскими осадочными карбонатными породами (доломитами, известняками). Сверху породы покрыты слоем четвертичного делювия – элювия (суглинками с дресвой, гравием) мощностью 0,4–2,1 м. Палеозойский элювий состоит из плотных ярко-красных и желтых песчаных глин и встречается на участках

¹ Автор настоящей статьи будет весьма признателен, если среди читающих эту статью найдется кто-нибудь, кто опровергнет это заявление.

² История // Уральское отделение Российской академии наук. Институт геофизики имени Ю.П. Булашевича [Электронный ресурс]. URL: <http://igfuran.ru/struktura/laboratoriya-ekologicheskoy-geofiziki/istoriya> (19.05.2023).

³ В этой работе изучены возможности метода дистанционного индуктивного зондирования в сравнении с сейсмическим методом преломленных волн и современным методом электротомографии. Автор работы убежден, что возможности метода дистанционного индуктивного зондирования далеко не исчерпаны, но при этом не упоминает, что среди этих возможностей есть технология изучения затухания гармонического электромагнитного поля на высокой частоте.

⁴ Technical Note TN-8. EM34-3 survey interpretation techniques / J.D. McNeill. Ontario: Geonics Limited, 1980. 17 p. [Электронный ресурс]. URL: <http://geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn8.pdf> (19.05.2023).



распространения тектонических разрывных нарушений до глубины 4,5–8,6 м и более.

Прочность осадочных пород изучена изыскательскими работами на глубине 0,8–11 м. По монолитам отобранных из керна скважин в лаборатории изготавливалось несколько образцов и по ним с надежностью 80 % определялись средние значения R_c – временного предела прочности на одноосное сжатие в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии⁵. Эта характеристика давно и широко применяется при изучении скально-полускальных грунтов в отечественном грунтоведении и зарубежной геотехнике. Из современных зарубежных публикаций в качестве типичного примера достаточно сослаться на работу, в которой характеристика R_c применялась вместе с горно-геологическими и техническими характеристиками при построении нейронной модели множественной регрессии с целью решения задачи прогноза скорости проходки буровых скважин с алмазным долотом на месторождениях Турции [9].

Метод ДИЗ выполнялся с применением аппаратуры среднечастотного электромагнитного зондирования (СЭМЗ), разработанной в НПО «Сибцветметавтоматика» (г. Красноярск) в 1991 г.⁶. В пяти параметрических точках скважин⁷ были измерены в четырех азимутах⁸ в интервале разности⁹ 5–100 м все составляющие поля ВВМД. Это вертикальная (H_z), горизонтальная (H_r) составляющие поля ВВМД, а также большая и малая оси эллипса поляризации и угол наклона большой оси к горизонту. Измерения сделаны на всех четырех высоких частотах, которые предоставляет аппаратура СЭМЗ (2,25, 1,125, 0,562, 0,281 МГц). В остальных случаях на всех скважинах измерялись только H_z и H_r . На стадии ретроспективного анализа данных метода ДИЗ, полу-

ченных на параметрических точках скважин, по альбому палеток¹⁰ и таблице из работы В.И. Иголкина и др. [4] были решены две задачи. Первая наиболее сложная задача – оценка эффективных значений электрофизических характеристик¹¹ осадочных пород. Вторая задача – определение по этим характеристикам эффективной глубины проникновения поля ВВМД в массив осадочных пород. Решение задач показало, что прочность пород лучше всего изучать на частоте 1,125 и 0,281 МГц. На первой частоте прочность изучается на глубине 6,5–11,7 м, а на второй – на глубине 12,3–27,5 м. Первая глубина совпадает с интервалом изыскательского опробования прочности пород в их наиболее изученной части на глубине 6–11 м. Вторая глубина охватывает границы структурной консолидации пород за пределами древней коры выветривания. Такая особенность применения метода ДИЗ создает благоприятные условия не только для корректного сопоставления геолого-геофизических значений R_c массива осадочных пород, но и для прогноза их изменения за пределами сопоставления, где вероятностная оценка прочности по затуханию поля ВВМД освобождается от сильного маскирующего влияния глинистого материала слоя делювиально-элювиальных отложений.

В отличие от изысканий, вероятностные оценки R_c определялись по модели г. Нерюнгри [10] с использованием модифицированного регрессионного уравнения степенной функции [11]. Входными данными для уравнения служили средние азимутальные значения коэффициента k . Именно по ним оценивалась интегральная мера затухания поля ВВМД в неоднородных по строению и изменчивых по составу, температуре и прочности осадочных породах. Значения k определялись путем их

⁵ ГОСТ 21135.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.

⁶ Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика» СССР, 1991. 30 с.

⁷ Точки расположены по углам и центру площадки станции размером 600×600 м².

⁸ Юг – север, восток – запад.

⁹ Расстояние между излучающей и приемной антеннами.

¹⁰ Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ: метод. пособие. Красноярск: НПО «Сибцветметавтоматика», 1991. 83 с.

¹¹ Вещественная часть относительной комплексной диэлектрической проницаемости (далее – проницаемость) и электрического сопротивления (далее – сопротивление).



приравнивания к значениям показателя степенной функции, которая описывала в заданном азимуте на частоте 1,125 и 0,281 МГц закономерное уменьшение значений H_z при увеличении разности.

Практический опыт свидетельствует, что в отличие от экспоненциальной функции, применяемой в теории электродинамики [12] при изучении идеализированных однородных изотропных геологических сред, степенная функция более корректно описывает процесс затухания поля ВВМД в реальных неоднородных анизотропных средах, в частности в изучаемых мерзлых осадочных породах.

Результаты исследования

В ходе исследования сравнивались результаты определений средних значений прочности, полученных по данным изысканий и метода ДИЗ. Сравнение производилось для наиболее неблагоприятных условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений, то есть по значениям прочности лабораторных образцов, насыщенных водой, и массива осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии. Такое допущение перехода из мерзлого низкотемпературного состояния (температура ниже $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$) или воздушно-сухого высокотемпературного морозного состояния (температура около $0 - -0,1...-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) предусматривает влияние антропогенно-техногенных факторов на фоне продолжающегося потепления климата с уже замедленным, но все же повышением среднегодовой температуры приземного слоя воздуха в криолитозоне Якутии [13–15].

Ради уменьшения действия масштабного фактора [16] и максимально возможного сближения точечных геологических и объемных геофизических оценок прочности первые дополнительно усреднялись. Делалось это по инженерно-геологическим элементам (ИГЭ) с учетом установленной по паспортам скважин и интерполируемой по линиям разрезов между скважинами мощности блоков осадочных пород разной степени трещиноватости. Эта

сложная и зачастую ручная длительная интеллектуальная работа сделана геологами-изыскателями на стадии составления технического отчета в соответствии с правилами и требованиями ГОСТ 20522-96¹². Важно отметить, что понятие ИГЭ впервые предложил Н.В. Коломенский. Об этом малоизвестном факте свидетельствуют его работы¹³ [17], а также монография В.А. Королёва и В.Т. Трофимова [18, с. 30] без уточнения того, в каком году было введено понятие ИГЭ. По просьбе автора настоящей статьи В.А. Королёв сделал уточнение, написав в личной переписке: «Н.В. Коломенский впервые опубликовал свои соображения по выделению ИГЭ в 1956 г. в учебнике “Инженерная геология”, вышедшем в двух томах. Эти соображения изложены им во втором томе учебника (разд. 2, гл. 2, с. 212–307). В примечании к этой главе написано, что “глава 2 составлена совместно с И.С. Комаровым”. Так что формально авторство выделения ИГЭ должно быть признано за этими двумя авторами». Как бы там ни было, точно известно, что применение ИГЭ в практике инженерной геологии и инженерно-строительных изысканий началось гораздо позже предложения Н.В. Коломенского и И.С. Комарова. Этому способствовало официальное утверждение сначала ГОСТ 20522-75, а затем ГОСТ 20522-96. В обновленном варианте эти документы заменены на ГОСТ 20522-2012.

Геолого-геофизическая изменчивость средних значений R_c массива осадочных пород на территории жилого поселка станции «Кюргеллях» показана в тоновом изображении, построенном с помощью программы «Сурфер-8». Интерполяция значений R_c выполнена способом Radial Basis Function. Этот способ сохраняет локальные особенности изменчивости прочности в некоторой окрестности с автоматически задаваемым программой радиусом взаимной интерполяции между точками скважин и ДИЗ.

Согласно данным изысканий, в исходном изображении изменчивости прочности (рис.

¹² ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1997. 24 с.

¹³ Коломенский Н.В. Общая методика инженерно-геологических исследований: учебник для вузов. М.: Недра, 1968. 324 с.



1, а) наблюдается полигональная структура тектонических разрывных нарушений в виде чередования линейных полос разной ориентации, близкой к взаимно перпендикулярной юго-восточной и западно-восточной ориентации.

В разрывных нарушениях осадочные породы в разной степени нарушены и ослаблены и находятся в дробленном и / или трещиноватом состоянии с прочностью ниже 40–35 МПа (участки зеленого цвета). Лишь в единичном случае в границах четко локализованного овального участка красного цвета породы находятся в разрушенном малопропрочном состоянии с прочностью меньше 15 МПа. Такие же три участка, но с повышенной граничной прочностью около 15 МПа наблюдаются в юго-западной и северо-западной части площадки в полосах зеленого цвета. В породах, вмещающих тектонические зоны дробления и трещиноватости (участки голубого и синего цвета), прочность пород выше и составляет около 40–50 МПа. Эти значения можно рассматривать как фон, означающий общую среднюю прочность для всей станции. На этом фоне видны фрагменты серо-черного цвета, которые представляют собой сохра-

нившиеся останцы наиболее крепких скальных осадочных пород со значением прочности 50–65 МПа. На одном из останцов (участок лазурного цвета в нижней части рис. 1, а) прочность достигает 65–75 МПа.

В сравнении с точечными данными изысканий (см. рис. 1, а) полигональная структура тектонической природы сохраняется и по объемным данным метода ДИЗ (см. рис. 1, б), но становится не такой отчетливой из-за перераспределения прочности в сторону общего ее повышения. В этой динамике с появлением в верхней части изображения расширенного разветвленного на три части участка крепких скальных пород (участка серо-черного цвета) остальные детали прочностной картины в целом сохраняются.

Изменение прочности осадочных пород на площадке жилого поселка станции «Кюргеллях» на глубине 6–12 м согласовано между данными изысканий и метода ДИЗ. Мера согласия высока и оценивается по приведенному значению коэффициента множественной детерминации, равному 0,815. Это означает¹⁴, что фактор прочности доминирует среди всех остальных мерзлотно-грунтовых факторов и оказывает равное влияние как на

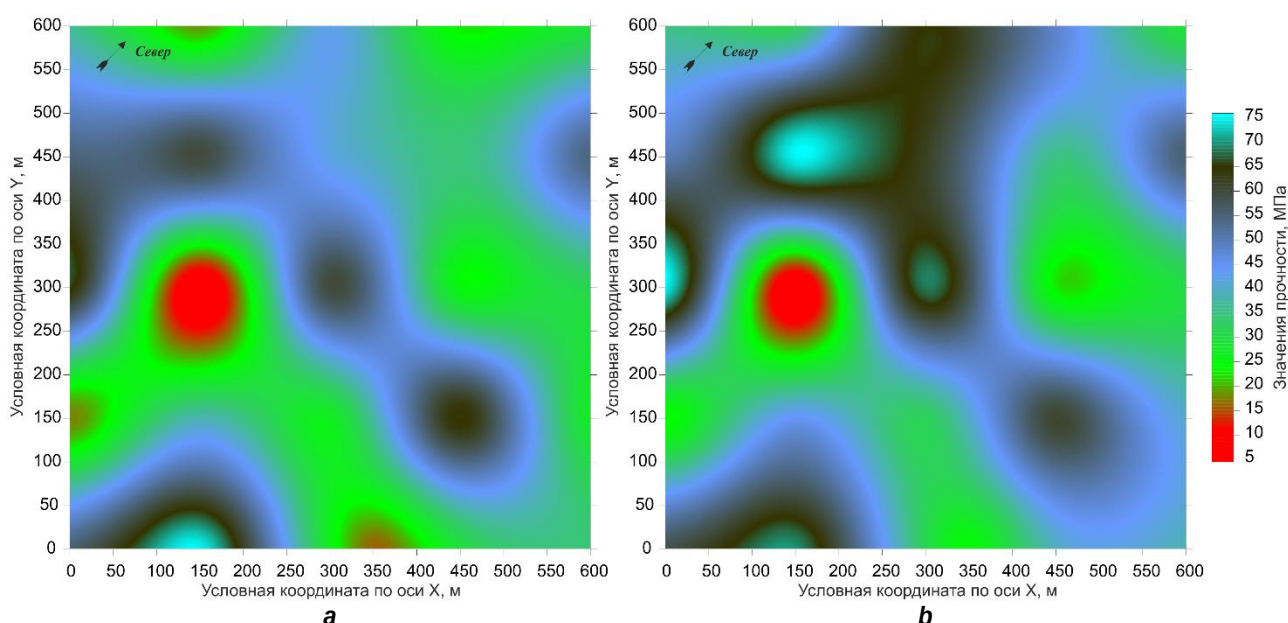


Рис. 1. Динамика прочности осадочных пород в 1990–1991 гг. на сопоставимой глубине опробования 6–12 м по данным изысканий (а) и метода дистанционного индуктивного зондирования (б)

Fig. 1. Dynamics of sedimentary rock strength in 1990–1991 at the comparable sampling depth of 6–12 m based on geotechnical site investigation (a) and geometric EM induction sounding (b)

¹⁴ Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных: учеб. пособие. М.: Форум: ИНФРА-М, 2017. 484 с.



лабораторную оценку прочности водонасыщенных образцов осадочных пород, так и на натурную геофизическую вероятностную оценку прочности массива пород в прогнозном водонасыщенном состоянии¹⁵. Доля этого влияния составляет не меньше 80 %. Этот факт есть не местная случайность, а природная закономерность, наблюдаемая в частном порядке. Она заключена и выражается в факторе прочности как интегральном показателе механических свойств осадочных и других пород с кристаллизационно-структурными связями.

Именно мера прочности, выражаемая в значениях R_c или другой характеристики, является собой итоговый объединяющий результат иерархического влияния всех остальных показателей состава, свойств и состояния пород на разномасштабных системных этапах. Такой же универсальной интегральной характеристикой, но уже со стороны электродинамики, служит удельное электрическое сопротивление почвогрунтов и пород. Вместе с диэлектрической проницаемостью оно регулирует затухание высокочастотных электромагнитных полей, в частности гармонического поля ВВМД. В отмеченном объединяющем пространстве подчинения и взаимоотношения и образуется «мостик» физических предпосылок для применения метода ДИЗ и других методов геоэлектрики на постоянном и переменном токе, в том числе методов георадиолокации и электротомографии.

После небольшого экскурса вернемся к рассмотрению результатов сравнительного анализа геолого-геофизических данных по прочности осадочных пород на площадке жилого поселка станции «Кюргеллях».

Переход в пространство проектно-строительной и инженерно-геологической категорий прочности скально-полускальных грунтов¹⁶ сопровождается кардинальной перестройкой изображения изменчивости прочности массива осадочных пород на сопоставимой глубине сравнения 6–12 м (рис. 2). Сохраняя черты полигональной тектонической структуры, изображение становится мозаичным и

предельно понятным геологам и проектировщикам как совместный результат геолого-геофизического ретроспективного районирования рассматриваемой территории, полученный на стадии проекта для периода изыскательских работ 1990–1991 гг. На изображении, построенном по данным изысканий (см. рис. 2, а) и данным метода ДИЗ (см. рис. 2, б), красным цветом обозначен потенциально опасный по просадкам основания и деформируемости конструкций инженерных сооружений овальный участок полускальных грунтов малой прочности (ниже 15 МПа) размером около 50 м. Серовато-синим и темно-синим цветами на рис. 2 выделены устойчивые участки скальных грунтов средней категории прочности (15–50 МПа) и прочной категории (50–120 МПа) соответственно.

В целом на изученной территории, и по данным изысканий, и по данным метода ДИЗ, основание инженерных сооружений сложено на глубине 6–12 м скальными грунтами. Среди них, согласно данным изысканий, лишь в одном случае (вероятность 4 %) встречаются полускальные грунты, относящиеся к малопрочной категории. Это участок красного цвета на рис. 2, а. В остальных случаях на долю грунтов средней категории прочности (светло-серый цвет) и прочной категории (темно-синий цвет) приходится 64 и 32 % со средними значениями R_c , равными 36,87 и 66,76 МПа соответственно. По данным метода ДИЗ (см. рис. 2, б), на отмеченной глубине практически ничего не изменилось в долевом соотношении и по показателю средней прочности грунтов:

- грунты малопрочной категории – 4 % с $R_c = 5,1$ МПа;
- грунты средней категории прочности – 60 % с $R_c = 35,03$ МПа;
- грунты прочной категории – 36 % с $R_c = 35,78$ МПа.

Изменения прочности осадочных пород на глубине 12,3–27,5 м (рис. 3) становятся, по данным метода ДИЗ, более регулярными и предсказуемыми в сравнении с изменениями на глубине 6,5–11,7 м, но не самостоятель-

¹⁵ В реальности массив осадочных пород находится в мерзлом льдистом или морозном воздушно-сухом состоянии.

¹⁶ ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М.: Стандартиформ, 2020. 38 с.



ными. По принципу генетической наследственности или преемственности, который нередко в геологии образно называют принципом «вершков и корешков», зональные изменения по глубине прочности любого массива пород, и в частности осадочных пород, закономерно передаются сверху вниз, постепенно ослабе-

вая в этом направлении. Объясняется эта природная закономерность снижением при увеличении глубины нивелирующего влияния экзогенных процессов [19] на прочность массива осадочных пород, и в том числе мощного по своей разрушительной силе процесса криогенного метаморфизма [20, 21].

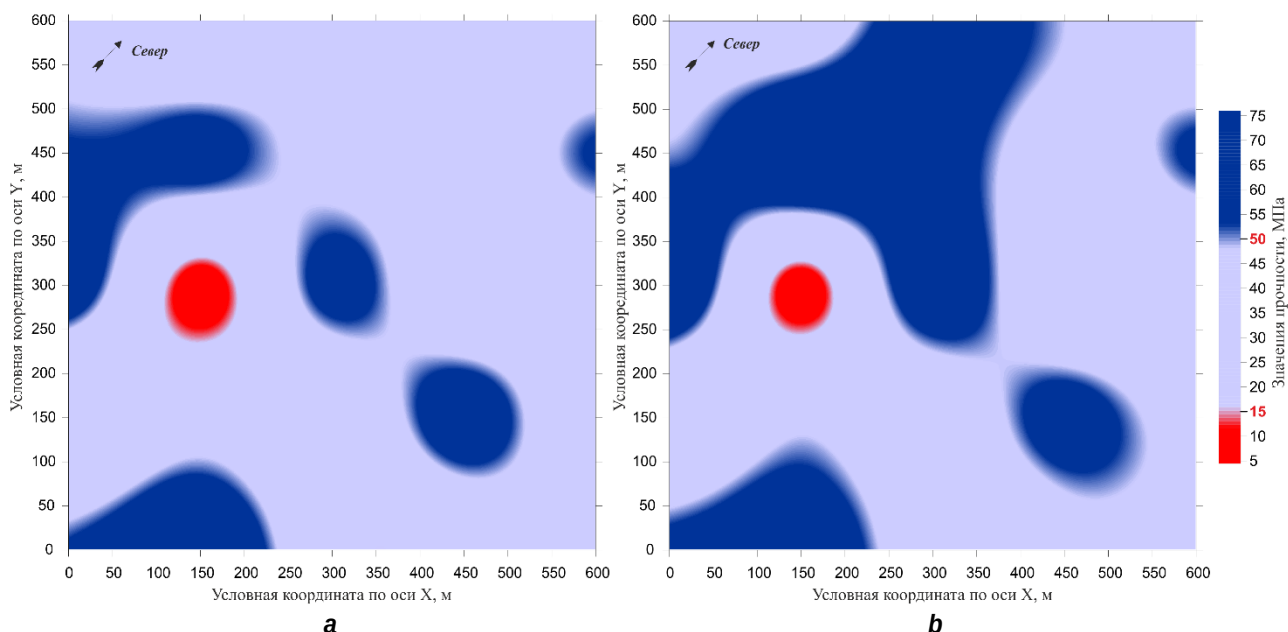


Рис. 2. Прочность осадочных пород в 1990–1991 гг. по категориям ГОСТ 25100-2020 на сопоставимой глубине опробования 6–12 м по данным изысканий (а) и метода дистанционного индуктивного зондирования (б)

Fig. 2. Sedimentary rock strength in 1990–1991 by GOST 25100-2020 classes at the comparable sampling depth of 6–12 m based on geotechnical site investigation (a) and geometric EM induction sounding (b)

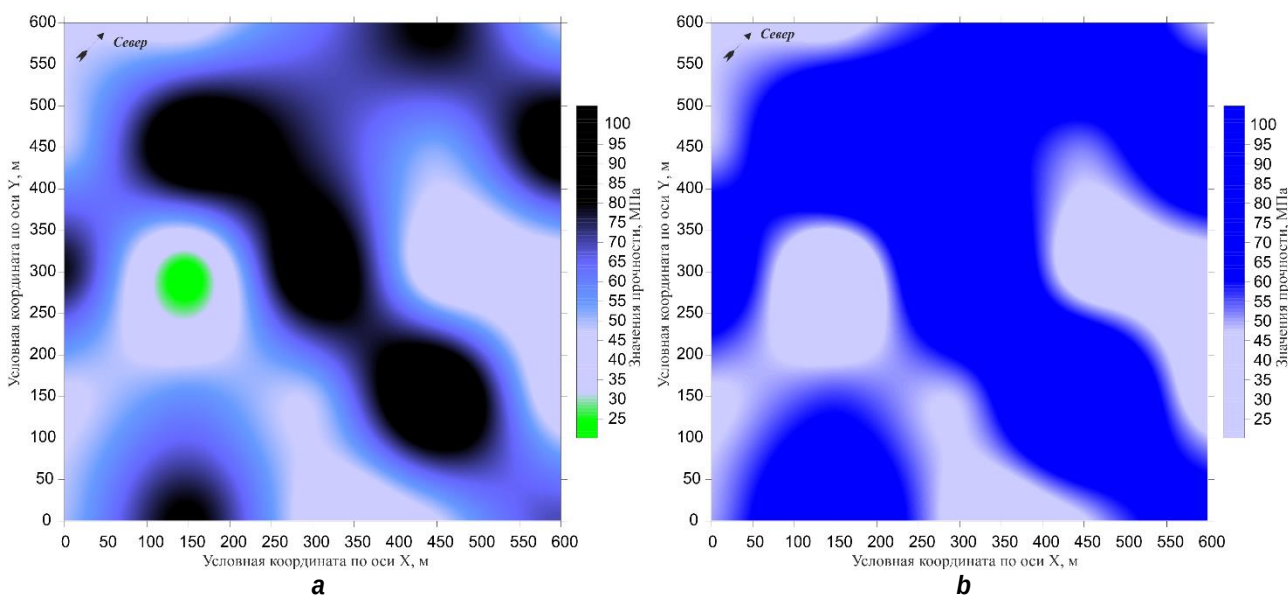


Рис. 3. Динамика прочности осадочных пород в 1990–1991 гг. по данным метода дистанционного индуктивного зондирования на глубине 12,3–27,5 м в исходном виде (а) и по категориям ГОСТ 25100-2020 (б)

Fig. 3. Dynamics of sedimentary rock strength in 1990–1991 based on geometric EM induction sounding at the depth of 12.3–27.5 m: original form (a) and by GOST 25100-2020 classes (b)



В рассматриваемом случае прирост глубины на 15–16 м ослабил связь, но не настолько, чтобы полностью потерять возможность при необходимости решать задачу прогноза прочности по данным метода ДИЗ¹⁷: прямую задачу с определением прочности на глубине 12,3–25,7 м, а обратную задачу – на глубине 6,5–11,7 м. Экономическая выгода такого информационного подхода состоит в сокращении времени и стоимости производства работ методом ДИЗ, так как по измерениям только на частоте 1,125 МГц можно изучить прочность массива осадочных пород на глубине 6,5–11,7 м, а затем сделать пересчет на глубину 12,3–25,7 м. Применение частоты 0,281 МГц изменяет порядок изучения прочности на обратный – снизу вверх. Благодаря снижению влияния разрушительных факторов (воды, ветра, температуры) фон прочности на глубине 12,3–27,5 м вырос до 59,47 МПа, то есть в 1,34 раза по сравнению с фоном прочности на глубине 6,5–11,7 м. Вместе с этим в изображении изменчивости прочности пород на сравнительно большой глубине стали проявляться в очищенном отфильтрованном виде черты реликтовой полигональной тектонической структуры (см. рис. 3, а).

В упорядоченном генерализованном пространстве категорий ГОСТ 25100-2020 переход на глубину 12,3–27,5 м сопровождается существенным перераспределением прочности осадочных пород (см. рис. 3, б). Причем – и это необходимо еще раз повторить – в предсказуемом пространстве категорий гораздо проще принимать правильные решения по вопросам инженерно-геологического районирования застраиваемых территорий и вопросам проектирования по размещению на этих территориях инженерных сооружений с благоприятными условиями. Действительно, одного взгляда (см. рис. 3, б) достаточно, чтобы правильно выбрать участок строительства

наиболее ответственного здания, например государственной районной электростанции, чтобы затем построить его на скальном основании с максимальной прочностью. По данным метода ДИЗ, такие благоприятные участки строительства (синий цвет) со средними значениями R_c от 50 до 104,8 МПа занимают большую часть площадки жилого поселка станции «Кюргеллях». Добавим, что в реальном морозном воздушно-сухом состоянии прочность массива осадочных пород будет выше¹⁸ примерно на 30–40 %.

Заключение

Исследования на станции «Кюргеллях» доказали возможности метода ДИЗ в решении задач геомеханики и инженерно-геологического районирования по категории прочности скально-полускальных грунтов в Южной Якутии. Аprobация метода ДИЗ удостоверяет, что при допущении прогнозного сценария перехода мерзлых осадочных пород в водонасыщенное состояние из-за влияния климатических и техногенных факторов породы по-прежнему остаются скальным основанием инженерных сооружений, построенных и эксплуатируемых на станции. На изученной в 1990–1991 гг. инженерно-геологическими изысканиями и методом ДИЗ сопоставимой глубине 6–12 м массив осадочных пород в большинстве случаев относится к категории средней прочности (15–50 МПа). Ниже, на глубине 12,3–27,5 м, согласно данным метода ДИЗ, доминируют породы прочной категории (50–120 МПа). Полученные результаты подтверждают мнение В.А. Давыдова о том, что возможности метода ДИЗ еще далеко не исчерпаны [5]. Именно в этом аспекте нужно возрождать на современном техническом уровне устаревший метод ДИЗ и включать его в индустрию строительства и горного дела наравне с методами георадиолокации и электротомографии.

Список источников

1. Грив Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна / отв. ред. Г.И. Кулаков. Новосибирск: Наука, 1999. 236 с.

¹⁷ По приведенному значению коэффициента множественной детерминации мера согласованной изменчивости прочности на глубине 6,5–11,7 и 12,3–27,5 м равна 0,657 [16].

¹⁸ Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986. 415 с. (таблица 115).



2. Нерадовский Л.Г. Изучение прочности оснований инженерных сооружений по затуханию электромагнитного поля в г. Нерюнгри // *Инновации*. 2022. № 4. С. 63–74. <https://doi.org/10.26310/2071-3010.2022.282.4.010>. EDN: VGASFK.
3. Задегиголова М.М. Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии: монография. М.: МГУ, 1998. 320 с.
4. Иголкин В.И., Шайдулов Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. Красноярск: СФУ, 2016. 272 с.
5. Давыдов В.А. Двумерная инверсия дистанционных индукционных зондирований // *Вопросы естествознания*. 2018. № 1. С. 62–69. EDN: QXVBGP.
6. Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: a review // *Journal of Applied Geophysics*. 2017. Vol. 139. P. 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.011>.
7. Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies // *Geoderma*. 2014. Vol. 223–225. P. 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>.
8. Sartorelli A.N., French R.B. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors // *Geophysics and Subsea Permafrost: Proc. 4th Can. Permafrost Conf.* 1982. P. 283–295.
9. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions // *Engineering Geology*. 2014. Vol. 173. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.02.006>.
10. Нерадовский Л.Г. Вероятностная модель прогноза прочности песчаников методом дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // *Криосфера Земли*. 2022. Т. 26. № 6. С. 43–57. <https://doi.org/10.15372/KZ20220605>. EDN: SJTDBR.
11. Нерадовский Л.Г. Оценка прочностного состояния скально-полускального основания инженерных сооружений г. Нерюнгри в криолитозоне Южной Якутии по данным геофизики (метода дистанционного индуктивного зондирования) // *Недропользование XXI век*. 2022. № 4. С. 91–97. EDN: GYJQML.
12. Светов Б.С. Основы геоэлектрики. М.: ЛКИ, 2008. 656 с.
13. Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрыбин П.Н. Мониторинг теплового режима грунтов Центральной Якутии. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2021. 155 с.
14. Шац М.М., Скачков Ю.Б. К дискуссии об основных тенденциях изменения климата Севера // *Климат и природа*. 2020. № 2. С. 3–18. EDN: PNLONU.
15. Скачков Ю.Б., Нерадовский Л.Г. Прогноз изменения температуры воздуха в Якутии до середины XXI века // *Ресурсы и риски регионов с вечной мерзлотой в меняющемся мире: сб. тр. X Междунар. конф. по мерзлотоведению ТИОП*. (г. Салехард, 25–29 июня 2012 г.). Салехард: Печатник, 2012. Т. 3. С. 471–474. EDN: VSJKXN.
16. Необутов Г.П. Влияние масштабного фактора на прочность льдопородного материала // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2012. № 2. С. 22–27. EDN: PVLNUJ.
17. Коломенский Н.В. Некоторые проблемы развития инженерной геологии // *Пути дальнейшего развития инженерной геологии: материалы дискуссии 1-го Междунар. конгресса по инженерной геологии*. М., 1971. С. 36–40.
18. Королёв В.А., Трофимов В.Т. Инженерная геология: история, методология и номологические основы: монография. М.: КДУ, 2016. 292 с.
19. Ярл Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. М.: Недра, 1991. 139 с.
20. Мельников А.Е., Павлов С.С., Колодезников И.И. Разрушение пород насыпи новой железнодорожной линии Томмот-Кердем Амуро-Якутской магистрали под воздействием криогенного выветривания // *Современные проблемы науки и образования*. 2014. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> (06.02.2022). EDN: SBWMQZ.
21. Забелин А.В. Количественная оценка влияния процессов криогенного выветривания на устойчивость откосов бортов угольных карьеров Южной Якутии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003. № 7. С. 11–13. EDN: KXFGGJ.

References

1. Grib N.N., Samokhin A.V. *Physical and mechanical properties of coal-bearing rocks in the South Yakutsk basin*. Novosibirsk: Nauka; 1999, 236 p. (In Russ.).
2. Neradovskii L.G. Study of the strength of the foundations of engineering structures for the attenuation of the electromagnetic field in the city of Neryungri. *Innovatsii = Innovations*. 2022;4:63-74. (In Russ.). <https://doi.org/10.26310/2071-3010.2022.282.4.010>. EDN: VGASFK.
3. Zaderigolova M.M. *Radio wave method in engineering and geoecology*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1998, 320 p. (In Russ.).
4. Igolkin V.I., Shaidurov G.Ya., Tronin O.A., Khokhlov M.F. *Methods and AC equipment for electromagnetic prospecting*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 2016, 272 p. (In Russ.).



5. Davydov V.A. Two-dimensional inversion of remote induction sounding. *Voprosy estestvoznaniya*. 2018;1:62-69. (In Russ.). EDN: XQXBGP.
6. Boaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: a review. *Journal of Applied Geophysics*. 2017;139:36-46. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.02.011>.
7. Doolittle J.A., Brevik E.C. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. *Geoderma*. 2014;223-225:33-45. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027>.
8. Sartorelli A.N., French R.B. Electro-magnetic induction methods for mapping permafrost along northern pipeline corridors. *Geophysics and Subsea Permafrost: Proc. 4th Can. Permafrost Conf.* 1982: 283-295.
9. Basarir H., Tutluoglu L., Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions. *Engineering Geology*. 2014;173:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.02.006>.
10. Neradovskii L.G. A probabilistic model for predicting sandstone strength using electromagnetic induction sounding in the Southern Yakutian permafrost region: a case study in Neryungri. *Kriosfera Zemli = Earth's Cryosphere*. 2022;26(6): 43-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/KZ20220605>. EDN: SJTDBR.
11. Neradovskii L.G. Assessment of the strength state of the rocky-semi-rocky foundation of engineering structures in the city of Neryungri in the permafrost zone of South Yakutia according to geophysics data (remote inductive sensing method). *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2022;4:91-97. (In Russ.). EDN: GYJQML.
12. Svetov B.S. *Fundamentals of geoelectrics*. Moscow: LKI; 2008, 656 p. (In Russ.).
13. Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N. *Monitoring of soil thermal regime in Central Yakutia*. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS; 2021, 155 p. (In Russ.).
14. Shatz M.M., Skachkov Yu.B. To discussion on the basic trends of climate change of the North. *Klimat i priroda*. 2020;2:3-18. (In Russ.). EDN: PNLNU.
15. Skachkov Yu.B., Neradovskii L.G. Forecast of air temperature changes in Yakutia until middle of the 21st century. In: *Resursy i riski regionov s vечноi merzlotoi v menyayushchetsya mire: sb. tr. X Mezhdunar. konf. po merzloto-vedeniyu TICOP = Resources and risks of permafrost regions in a changing world: collected papers of the 10th International conference on permafrost TICOP*. 25–29 June 2012, Salekhard. Salekhard: Pechatnik; 2012, vol. 3, p. 471-474. (In Russ.). EDN: VSJKXN.
16. Neobutov G.P. The influence of large-scale factor for strength of ice-rock filling. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2012;2:22-27. (In Russ.). EDN: PVLNUJ.
17. Kolomenskii N.V. Some problems of engineering geology development. In: *Puti dal'neishego razvitiya inzhenernoi geologii: materialy diskussii 1-go Mezhdunar. kongressa po inzhenernoi geologii = Further development trends of engineering geology: discussion materials of the 1st International Congress on Engineering Geology*. Moscow; 1971, p. 36-40. (In Russ.).
18. Korolev V.A., Trofimov V.T. *Engineering geology: history, methodology and nomological foundations*. Moscow: KDU; 2016, 292 p. (In Russ.).
19. Yarg L.A. *Methods of engineering-geological studies of the weathering process and its crusts*. Moscow: Nedra; 1991, 139 p. (In Russ.).
20. Melnikov A.E., Pavlov S.S., Kolodeznikov I.I. Rock destruction of the body of railroad of the Tommot-Kerem Amur-Yakutsk new line under the influence of the frost weathering. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;2. Available from: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> [Accessed 6th February 2022]. (In Russ.). EDN: SBWMQZ.
21. Zabelin A.V. Quantitative estimation of frost weathering effects on coal mine slope stability in Southern Yakutia. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' = Mining informational and analytical bulletin*. 2003;7:11-13. EDN: KXFGGJ. (In Russ.).

Информация об авторе / Information about the author



Нерадовский Леонид Георгиевич,

старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии,
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
г. Якутск, Россия,

✉ L031950N@ya.ru

РИНЦ Author ID: 394470

Scopus Author ID: 17344126100

Leonid G. Neradovskii,

Senior Researcher of the Laboratory of Engineering Geocryology,
Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
Yakutsk, Russia,

✉ L031950N@ya.ru

RSCI Author ID: 394470

Scopus Author ID: 17344126100



Вклад автора / Contribution of the author

Автор выполнил исследовательскую работу, на основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

The author performed the research, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

The author declares no conflicts of interests.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 08.08.2023; одобрена после рецензирования 24.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was submitted 08.08.2023; approved after reviewing 24.08.2023; accepted for publication 11.09.2023.