



Научная статья

УДК 552.513

EDN: DMQLDX

DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-4

Инженерно-геологическое районирование по электрофизическим характеристикам углевмещающих осадочных пород Южной Якутии для целей градостроительства на территории города Нерюнгри

Л.Г. Нерадовский^a✉

^aИнститут мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Российская Федерация

Резюме. Целью проведенного исследования являлось решение типовой задачи инженерно-геологического районирования территории г. Нерюнгри по комплексу эффективных значений электрофизических характеристик углевмещающих осадочных пород с выделением участков, благоприятных и неблагоприятных для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Решение задачи районирования получено по данным метода дистанционного индуктивного зондирования с применением метода факторного анализа – главных компонент. В результате исследования выделены шесть факторов: разуплотнение, литология, литогенная трещиноватость, тектоническая трещиноватость, свойства (глинистость – льдистость), температура. Из них к статусу главных факторов с суммарным вкладом в дисперсию (энергию) изменчивости электрофизических характеристик, равной 55,53 %, относятся разуплотнение и литология. Они сильно влияют на затухание гармонического электромагнитного поля на частоте 1,125 и 0,281 МГц и на электросопротивление и вещественную часть комплексной диэлектрической проницаемости на частоте 0,281 МГц. Факторы трещиноватости с суммарным вкладом, равным 33,05 %, влияют исключительно на характеристики анизотропии (коэффициент и азимут). По вычисленному после взвешенного суммирования всех факторов комплексному среднему значению построена схема вышеуказанного районирования, в которой участки с благоприятными и неблагоприятными условиями распределены по площади с равной вероятностью. Факторный анализ математически строго и содержательно корректно дополняет и детализирует данные инженерно-геологических изысканий о сложном неоднородном тектоническом и экзогенно-криогенном строении, а также сильной площадной изменчивости прочностного и влажностно-температурного состояния мерзлых – немерзлых и техногенно-антропогенных талых углевмещающих осадочных пород в изученной центральной части г. Нерюнгри.

Ключевые слова: г. Нерюнгри, осадочные породы, электрофизические характеристики, инженерно-геологическое районирование, условия строительства, факторный анализ, дистанционное индуктивное зондирование

Финансирование. Работа выполнена за счет госбюджетного финансирования в лаборатории инженерной геоэкологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН по проекту (этап 2026 г.) «Устойчивость инженерных сооружений в криолитозоне. Методы контроля и прогноз состояния. Криогенные ресурсы» (регистрационный номер проекта FUFU-2026-0007).

Благодарности. Посвящается незабвенному дорогому Г.С. Вахромееву, строгому наставнику и мудрому учителю, мастеру творческого подхода к решению геологических задач с применением рационального комплекса геолого-геофизических методов.

Для цитирования. Нерадовский Л.Г. Инженерно-геологическое районирование по электрофизическим характеристикам углевмещающих осадочных пород Южной Якутии для целей градостроительства на территории города Нерюнгри // Науки о Земле и недропользование. 2026. Т. 49. № ?. С. ?–?. DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-4. EDN: DMQLDX.



Original article

Engineering and geological zoning based on electrophysical characteristics of coal-bearing sedimentary rocks in Southern Yakutia for urban planning purposes in the city of Neryungri

Leonid G. Neradovskii✉

^aMelnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Abstract. The purpose of the conducted research is to solve a typical problem of engineering and geological zoning of the territory of the city of Neryungri based on the complex of effective values of electrophysical characteristics of coal-bearing sedimentary rocks, with the identification of areas favorable and unfavorable for the construction and operation of engineering structures. A zoning solution was derived from remote inductive sounding data using factor analysis (principal component method). The study resulted in the identification of six factors: decompaction, lithology, lithogenic fracturing, tectonic fracturing, material properties (clay content vs. ice content), and temperature. The former (decompaction and lithology) are referred to the main factors with the total contribution to the variance (energy) of variability of electrophysical characteristics equal to 55.53%. They have a significant impact on the attenuation of the harmonic electromagnetic field at the frequencies of 1.125 and 0.281 MHz, as well as on the electrical resistivity and the real part of the complex dielectric permittivity at the frequency of 0.281 MHz. Fracturing factors with the total contribution of 33.05% affect only the anisotropy characteristics (coefficient and azimuth). Based on the complex mean value calculated after weighted summation of all factors, a layout of the above-mentioned zoning was constructed, in which areas with favorable and unfavorable conditions have been distributed over the area with equal probability. Factor analysis provides a mathematically rigorous and substantively sound supplement and elaboration to engineering-geological survey data regarding the complex, heterogeneous tectonic and exogenous-cryogenic structure, as well as the pronounced spatial variability in the strength and moisture-temperature conditions of frozen, unfrozen, and technogenic-anthropogenic thawed coal-bearing sedimentary rocks in the studied central part of the city of Neryungri.

Keywords: Neryungri, sedimentary rocks, electrophysical characteristics, engineering and geological zoning, construction conditions, factor analysis, remote inductive sounding

Funding. This work was supported by state budget funding at the Laboratory of Engineering Geocryology of the Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, under the project (2026 stage) "Stability of engineering structures in the permafrost zone. Monitoring methods and state forecasting. Cryogenic resources" (project registration number FUFU-2026-0007).

Acknowledgments. Dedicated to the unforgettable and dear G.S. Vakhromeev, a strict mentor, wise teacher and a master of the creative approach to solving geological problems using a rational set of geological and geophysical methods.

For citation: Neradovskii L.G. Engineering and geological zoning based on electrophysical characteristics of coal-bearing sedimentary rocks in Southern Yakutia for urban planning purposes in the city of Neryungri. *Earth sciences and subsoil use*. 2026;49(?):?-?. (In Russ.). DOI: 10.21285/2686-9993-2026-49-3-4. EDN: DMQLDX.

Введение

В данной статье описан результат применения одного из методов факторного анализа для изучения совокупной изменчивости электрофизических характеристик углевещающих осадочных пород Южной Якутии в основании инженерных сооружений на территории г. Нерюнгри. Цель исследования состояла в доказательстве технико-методической и геоинформационной возможности метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) в решении задачи инженерно-геологического районирования освоенных и осваиваемых территорий России, в частности Южной Якутии, с выделением по разным факторным категориям участков, благоприятных и неблагоприятных для строительства и эксплуатации

инженерных сооружений на скально-полускальных грунтах.

Исключительная важность решения этой задачи объясняется необходимостью сохранения жизни и здоровья людей, а также защиты в течение длительного времени (не менее 50 лет) особо опасных и ответственных промышленных объектов, включая стратегически значимые сооружения (гидроэлектростанции, атомные электростанции и др.). В XX в. качество, полнота и надежность решения задач инженерно-геологического районирования в проектно-изыскательских работах достигались последовательным изучением геологической среды на нескольких стадиях: рекогносцировочной, технико-экономической, технического проекта, рабочего проекта



и рабочей документации¹. В то же время на всех стадиях, за исключением детальных стадий изысканий (рабочего проекта и рабочей документации) под отдельные инженерные сооружения, горно-буровые работы сопровождались геофизическими работами. В настоящее время рыночной экономики с принципом «прибыль любой ценой» многостадийное изучение геологической среды ушло в прошлое и стало необязательным, как и применение методов геофизики, хотя их число и технико-методические возможности существенно возросли вместе с многообразием условий и ранее не решаемых специфических задач, например нетривиальных задач изучения фундаментов инженерных сооружений [1–5]. При этом в большинстве случаев наземные методы геофизики по-прежнему решают задачи районирования или картирования границ поисковых объектов в различных аспектах и вариантах целевого предназначения (геолого-разведочном, инженерно-геологическом, инженерно-техническом, экологическом, археологическом и других). Это сугубо геофизическое информационное направление, ранее полностью изолированное от других областей знаний в перечне наук о Земле, предлагают объединить с геоинформационным и картографическим направлениями. Цель такого пока еще теоретического объединения заключается в создании единой симбиотической системы [6] космического или воздушного районирования поверхности Земли. Ожидается, что такая система станет источником сопряженных региональных знаний по разным участкам, что необходимо для полноценного обучения нейросетей – систем искусственного интеллекта с большими языковыми моделями² [7–17]. Хотя результат симбиоза геоинформационных и картографических систем проявится лишь в будущем, в настоящее время среди отечественных пользователей преобладают свободно распространяемые зарубежные геоинформационные системы общего назначения, такие как ArcMap и QGIS. С их помощью решается широкий спектр задач при-

родопользования и недропользования, в том числе районирования типов ландшафтов [18], оценка степени заболоченности местности с подсчетом запасов торфяных месторождений [19], анализ динамики границ распространения ледников и степени загрязненности снега [20, 21], расчет индексов демографии, качества жизни и здоровья населения [22, 23], а также другие аналогичные задачи.

В настоящей работе задача инженерно-геологического районирования территории г. Нерюнгри по электрофизическим характеристикам углевмещающих осадочных пород решена с применением не комплекса методов геофизики, а единственного, но всесторонне апробированного для условий прерывисто-островной мерзлоты Южной Якутии метода ДИЗ. Этот метод хорошо зарекомендовал себя в оценке прочности осадочных пород [24], картирования границ тектонических зон дробления и повышенной трещиноватости, а также реликтовых очагов мощных сейсмогенных механических напряжений [25]. Выбор единственного метода ДИЗ вместо комплекса методов геофизики обусловлен объективными административно-организационными и финансовыми ограничениями, исключающими возможность дополнительного приобретения современной дорогостоящей геофизической аппаратуры и оборудования.

Материалы и методы исследования

Участок исследований. Исследования выполнены в г. Нерюнгри – административном центре Южной Якутии, расположенном примерно в 800 км на юго-запад от г. Якутска – столицы Республики Саха (Якутия). В центральной части города рельеф дневной поверхности пологонаклонный в северо-восточном направлении к долинам мелководных рек Малый Беркакит и Амнуннакта. В этом направлении абсолютные отметки высоты рельефа уменьшаются от 871–848 до 842–832 м.

Территория г. Нерюнгри находится в зоне складчатости по краевому шву Предстанового

¹ Левкович А.И. Методика обоснования состава и объемов инженерно-геологических изысканий для строительства различных типов зданий и сооружений промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения в районах распространения вечномёрзлых грунтов с учетом требований проектирования. М.: Изд-во Госстроя РФСР, НПО «Стройизыскания», 1989. 173 с.

² Искусственный интеллект в нефтегазовой отрасли: практики внедрения, вызовы и потенциал развития: доклад по итогам сессии экспертного клуба Евразийского союза экспертов по недропользованию // Eues.ru. Режим доступа: <http://eues.ru/news/iskusstvennyi-intellekt-v-neftegazovoi-otrasli-praktika-vnedrenia-vyzovy-i-potencial-razvitiia> (дата обращения: 13.11.2025).



прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья в пределах Чульманской впадины. Инженерно-геологические региональные условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений типичны для Алдано-Чульманского горнопромышленного района [26] и, возможно, для всей прерывисто-островной мерзлоты Южной Якутии, где в мезозойских депрессиях (впадинах) распространена мерзлая толща углевмещающих осадочных пород юры и нижнего мела с разной температурой в слое годовых теплооборотов [27, 28]. По данным В.М. Желинского [29], и это очень важно, в толще осадочных пород Южной Якутии доминирующим литотипом являются песчаники.

По данным Южно-Якутской комплексной геолого-разведочной экспедиции и ООО «Нерюнгристройизыскания», в г. Нерюнгри песчаники в стратиграфическом отношении составляют кабактинскую свиту верхнеюрского возраста. В структурном отношении свита смята тектоническими процессами в антиклиналь с углом падения 35–40° в северной сводовой части. В направлении к южным крыльям антиклинали угол падения уменьшается до 15–20°. Слабые по прочности прослои и слои глинистых алевролитов, углистых аргиллитов и каменных углей имеют подчиненное отношение к песчаникам и распространены преимущественно в северной части г. Нерюнгри. Состав песчаников кварц-полевошпатовый мелко-среднезернистый. Минеральная матрица песчаников скреплена преимущественно карбонатным цементом и реже слабым глинистым цементом. Преобладающий цвет песчаников серый с зеленовато-голубым оттенком у прочных разностей. У выветренных песчаников цвет желтый. Сверху массив песчаников перекрыт аллювиальными (пески, супеси, суглинки) и делювиальными (дресва, щебень, гравий) отложениями. Общая средняя мощность отложений составляет около 3 м. В некоторых местах³ коренное основание массива песчаников выходит на дневную поверхность. Мощность деятельного слоя с сезонным оттаиванием – промерзанием толщ осадочных пород достигает 4–6 м.

На однородном литогенном фоне как в местном (г. Нерюнгри), так и в региональном масштабе (Южная Якутия) проявляют себя две главенствующие природные черты. Первая

черта – неоднородность строения и высокая изменчивость по площади и глубине прочности песчаников, разуплотненных процессами разрывной и пликтивной тектоники с образованием сложнейшей разноориентированной линейной системы дробления и повышенной трещиноватости типа «разбитой тарелки» [30, 31]. Вторая черта – сложная по строению в пространстве и неустойчивая во времени прерывисто-островная мерзлота [26, 27]. Она сформировалась позднее тектонических процессов с наложением на результат их действия экзогенных и климатических процессов, включая процесс криогипергенеза или криогенного метаморфизма [32], который наиболее сильно проявляет себя в верхней части слоя годовых теплооборотов до глубины 3–7 м.

Строение, мощность и температура прерывисто-островной мерзлоты зависят от влияния климата, ландшафта, геоморфологии местности и теплофизических свойств углевмещающей толщ осадочных пород [26]. По данным инженерно-геологической съемки, острова мерзлых песчаников занимают 57 % площади г. Нерюнгри. Снизу мощность и криогенное состояние островной мерзлоты регулируются мощными внутриземными тепловыми потоками [27]. По общим оценкам мощность островной мерзлоты на водоразделах Алдано-Чульманского горнопромышленного района, включая г. Нерюнгри, преимущественно равна 20–50 м. В долинах рек и ручьев, а также на склонах северной экспозиции мощность мерзлоты увеличивается до 150–200 м [28]. Среднегодовая температура осадочных пород на водоразделах в примыкании к нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10–15 м близка к 0 °С (-0,1...-0,5 °С). В долинах рек, покрытых моховым покровом, температура на этой глубине снижается до -1...-4 °С. В г. Нерюнгри температура островной мерзлоты повысилась из-за уничтоженного строительными работами теплоизолирующего почвенно-растительного покрова и частично или полностью убранного слоя аллювия – делювия. Полная деградация мерзлоты произошла под аварийными зданиями в результате действия антропогенно-техногенных факторов⁴. На этих участках температура повысилась на глубине 10–15 м до 2–7 °С.

³ Эти места составляют около 20 % изученной центральной части территории г. Нерюнгри.

⁴ Прорыва пресной воды из систем питьевого и теплового водоснабжения и минерализованной жидкости (фекалий) из систем канализации.



Материал и методика исследований. Фактическим материалом для факторного анализа служили эффективные значения электрофизических характеристик⁵ углеводящих осадочных пород, определенные методом ДИЗ⁶ в весенние периоды 2017–2026 гг. на хорошо изученном эталонно-тестовом полигоне – центральной части г. Нерюнгри. Значения характеристик определены в 575 точках ДИЗ по результатам измерений устоявшегося

во времени эллиптически поляризованного гармонического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД). Измерения выполнялись с помощью портативной аппаратуры среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования (СЭМЗ)⁷. Система дискретных наблюдений с почти равномерным расположением между зданиями и сооружениями точек ДИЗ при расстоянии между ними 47–75 м показана на рис. 1. Выбор весен-

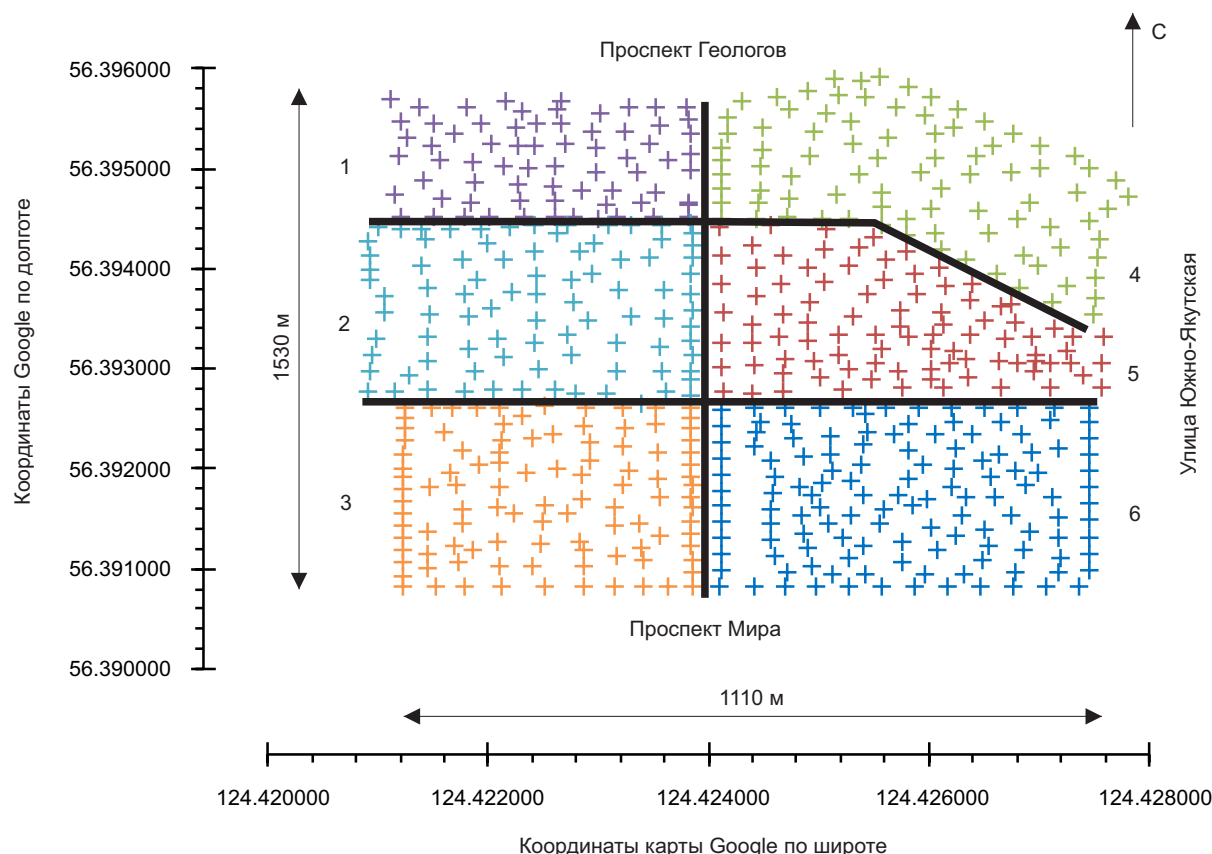


Рис. 1. Схема местоположение точек дистанционного индуктивного зондирования в микрорайонах центральной части г. Нерюнгри

Шифр номеров микрорайонов: 1 – В; 2 – Г–Е; 3 – М; 4 – А; 5 – Б; 6 – К

Вертикальная линия – проспект Ленина

Верхняя горизонтально-наклонная линия и нижняя горизонтальная линия – проспекты Карла Маркса и Дружбы Народов

Fig. 1. Layout of the location of remote inductive sounding points in the microdistricts of the central part of Neryungri

Code of microdistrict numbers: 1 – V; 2 – G–E; 3 – M; 4 – A; 5 – B; 6 – K

Vertical line – Lenin Avenue

Upper horizontally inclined line and lower horizontal line – Karl Marx Avenue and Druzhba Narodov Avenue

⁵ Латинский термин «атрибут» активно применяется в сейсмометрии, георадиолокации и иных методах геофизики. Однако древнегреческий термин «характеристика» представляется более корректным и универсальным: он исчерпывающе точно отражает познавательную суть, позволяя полноценно описать объект и предмет научно-практических исследований в качественном и количественном отношении.

⁶ История развития и вопросы методики работ методом дистанционного индуктивного зондирования подробно изложены в монографии по применению этого метода в Южной Якутии [25].

⁷ Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. Красноярск: Изд-во НПО «Сибцветметавтоматика» СССР, 1991. 30 с.



него периода времени для проведения работ методом ДИЗ объясняется необходимостью устранить искажающее влияние на результаты измерений поля ВВМД хорошо проводящей электрический ток летом – осенью верхней сильновыветренной части углевмещающих осадочных пород. Эта часть сложена песками, супесями и суглинками покровных аллювиально-делювиальных отложений и подстилающего слоя элювия с большим количеством глинистого материала, заполняющего промежутки между глыб, гравием, щебнем и дресвой.

Первая электрофизическая характеристика представлена значениями коэффициента монотонного затухания поля ВВМД. Значения определены в 2017–2023 гг. на частоте 1,125 МГц с разносом приемной антенны от неподвижной передающей антенны аппаратуры СЭМЗ на расстояние 5–50 м в каком-либо одном направлении, свободном от разного рода препятствий и помех (домов, гаражей, строительных конструкций и материалов, автомобилей, скопления людей и др.).

Вторая электрофизическая характеристика представлена дискретно-интервальными значениями среднего азимутального удельного затухания поля ВВМД (далее – удельное затухание поля ВВМД). Значения определены в 2024–2026 гг. на частоте 0,281 МГц в восьми неизменных в каждой точке ДИЗ азимутах с двумя фиксированными значениями разноса приемной антенны, равными 5 и 25 м.

Третья и четвертая электрофизические характеристики представлены значениями электросопротивления и вещественной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости (далее – диэлектрическая проницаемость). Значения определены в 2017–2023 гг. на частоте 1,125 МГц с двумя значениями разноса 5 и 40 м в едином, но разном направлении [33–35]. Для учета частотной дисперсии значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости были приведены к частоте 0,281 МГц. Коррекция выполнена с использованием эмпирических поправочных коэффициентов: для электросопротивления применен понижающий коэффициент 1,9, для диэлектрической проницаемости – повышающий коэффициент 1,3.

Пятая и шестая электрофизические характеристики представлены значениями коэффи-

циента анизотропии и дискретными значениями⁸ азимута вектора анизотропии. Значения определены в 2024–2026 гг. с такими же параметрами индуктивного зондирования, как и при определении значений удельного затухания поля ВВМД. Коэффициент анизотропии вычислен по отношению максимального значения удельного затухания поля ВВМД к минимальному значению.

Приведение к единой частоте 0,281 МГц значений с подобранными значениями разноса приемной антенны аппаратуры СЭМЗ, равными 5 и 25 м, обеспечили единообразие условий и корректность изучения методом факторного анализа совокупной изменчивости электрофизических характеристик в основании инженерных сооружений на глубине 6–18 м. Этот интервал глубины охватывает горизонт трещиноватых углевмещающих осадочных пород, залегающий ниже сезонного – мерзлого слоя аллювиально-делювиальных отложений и подстилающего элювия осадочных пород, включая их верхнюю сильновыветренную часть. По данным инженерно-геологических изысканий, структурная граница между сильновыветренными и трещиноватыми породами совпадает с криогенной границей сезонного промерзания – оттаивания и залегает в среднем на глубине 4–6 м.

Таким образом, матрица фактического материала для решения поставленной задачи электрофизического районирования территории г. Нерюнгри с использованием метода факторного анализа состоит из 6 столбцов (чисел электрофизических характеристик) и 575 строк (номеров и координат точек ДИЗ). Согласно правилам математической статистики, такой объем исходных данных более чем достаточен для корректного решения задач факторного анализа. Их решение получено каноническим методом главных компонент с помощью программы А.П. Кулаичева⁹ «Стадия» и программы Statistica версии 6.0 (доступной для свободного использования). Перед их применением электрофизические характеристики, различающиеся по масштабу значений (единицы – тысячи), приведены к единому относительному уровню через стандартное z-преобразование. Это обеспечило сопоставимость характеристик перед факторным анализом.

⁸ Номерами направлений.

⁹ Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М.: Изд-во Форум: Инфра-М, 2006. 512 с.



Проведенный обзор научно-технической литературы свидетельствует о продолжении теоретико-технического совершенствования методов факторного анализа и их применения в решении все более и более стремительно усложняющихся задач геологии и геофизики с применением нейросетей [36]. Некоторые примеры решения этих задач приведены в ряде репрезентативных публикаций, демонстрирующих развитие метода факторного анализа [37–40].

Основные современные тенденции развития методов факторного анализа, адаптируемые к требованиям современного недропользования, реализуются по следующим направлениям:

1. Переход от традиционных описательных методов к математическим методам количественной интерпретации с принятием взвешенных обоснованных практических решений в части комплексной классификации объектов поиска и разведки месторождений полезных ископаемых и оценки их перспективности.

2. Развитие пространственных вариантов с картографически-географической привязкой результатов, включая более точное определение границ местоположения локальных аномалий.

3. Внедрение робастных технологий с решением проблемы «ураганных» по минерализации геохимических проб для более точного подсчета запасов рудных месторождений.

4. Интеграция с другими методами многомерного статистического анализа с целью построения комплексных физико-геологических моделей для решения сложных многоуровневых структурно-петрографических и петрофизических задач прогнозирования.

5. Расширение числа и типа задач от традиционных задач геохимического поиска и разведки рудных месторождений до специфических инженерно-технологических задач недропользования.

Хотя все направления так или иначе решают задачи районирования, будь то картографический вариант или иной подход, последнее из них выделяется особой близостью к концепции инженерно-геологического районирования застраиваемых территорий в районах промышленного освоения месторождений полезных ископаемых. Вместе с тем анализ

отечественной и зарубежной литературы показал, что специальных работ, посвященных этому направлению, не представлено.

Результаты исследования и их обсуждение

Прежде чем приступать к обсуждению результатов факторного анализа, обратим внимание на законы и статистики вероятностных распределений значений электрофизических характеристик углевмещающих осадочных пород. Почему это необходимо сделать? Потому, что и законы, и статистики любой геофизической характеристики констатируют и визуализируют результат реакции геологической среды на ее искусственное возбуждение электрическими полями. В частности, электромагнитным гармоническим полем ВВМД на осадочные породы. В этом системном аспекте и будем анализировать вероятностные распределения, построенные в виде гистограмм на рис. 2.

Визуальный анализ гистограмм и без строгой тестовой проверки¹⁰ удостоверяет, что значения всех характеристик распределены по разным законам и не подчиняются общему фундаментальному закону больших чисел¹¹. Несбалансированные распределения единичных значений характеристик вблизи средних значений подтверждают по данным геофизики сложное неоднородное структурно-тектоническое строение и сильную латеральную изменчивость минерального, гранулометрического состава и физико-механических свойств углевмещающих осадочных пород. Такая изменчивость приводит к тонкой дифференцированной реакции пород на электромагнитное возбуждение на частоте 1,125 МГц. Этот эффект отчетливо прослеживается на гистограмме коэффициента затухания поля ВВМД (см. рис. 2, а). В сравнении с другими гистограммами она имеет наиболее сложную мультипликативную вероятностную структуру и состоит из трех групп.

Первая группа расположена в начале гистограммы. Ее четко обособленный аномальный максимум означает, что в центральной части г. Нерюнгри наиболее часто встречаются значения затухания поля ВВМД в интервале 1,44–1,62 м⁻¹ со средним значением 1,54 м⁻¹. Однако их доля по отношению к общему чис-

¹⁰ По независимым критериям Колмогорова, хи-квадрат и омега-квадрат.

¹¹ Закону нормального распределения.

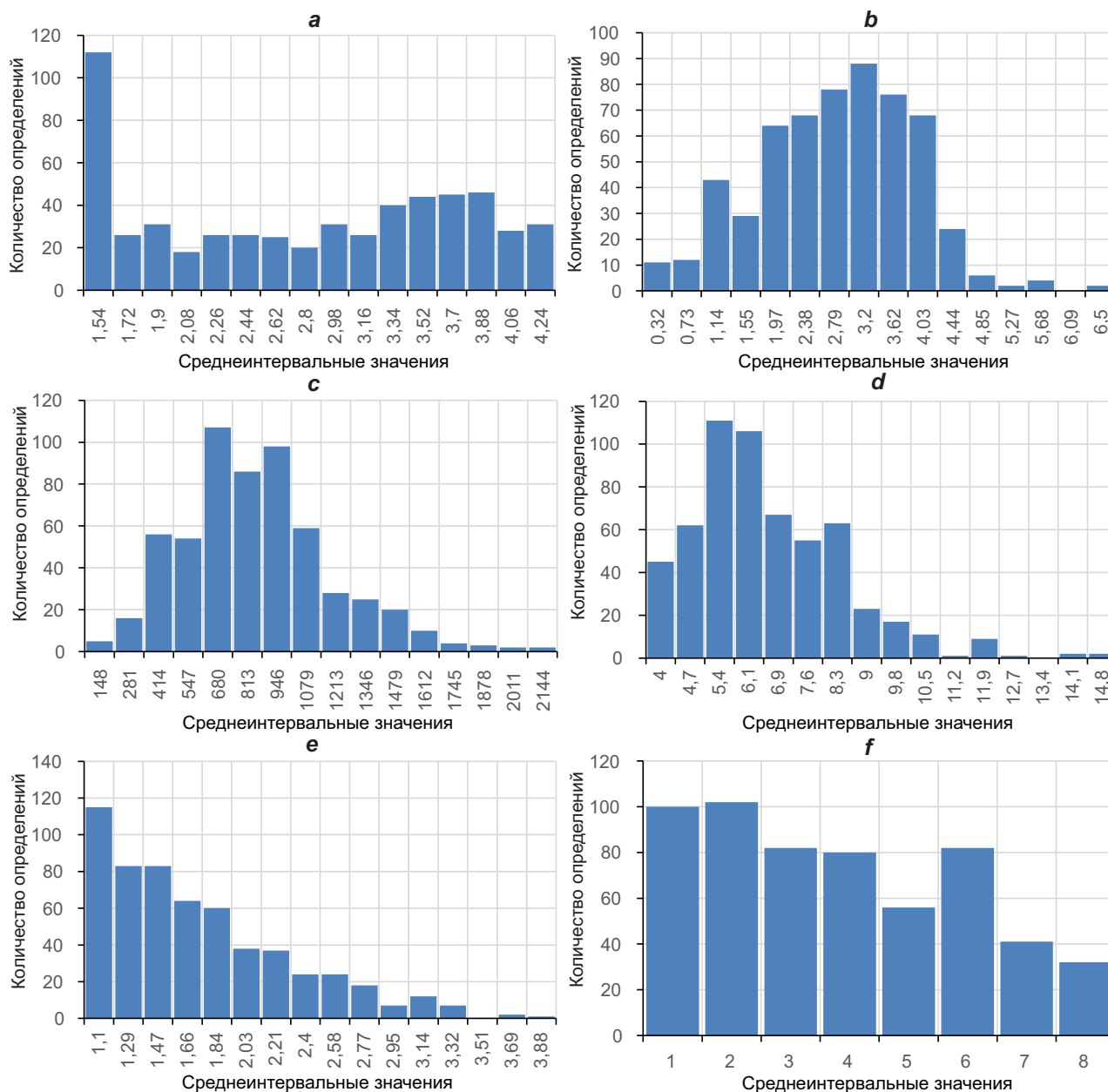


Рис. 2. Гистограммы эффективных значений электрофизических характеристик углеводородных осадочных пород на территории г. Нерюнгри:

а – коэффициент затухания поля высокочастотного вертикального магнитного диполя на частоте 1,125 МГц, м⁻¹; б – удельное затухание поля высокочастотного вертикального магнитного диполя на частоте 0,281 МГц, дБ/м; в – электросопротивление на частоте 0,281 МГц, Ом×м; г – диэлектрическая проницаемость на частоте 0,281 МГц, отн. ед.; е – коэффициент анизотропии на частоте 0,281 МГц, отн. ед.; ф – номера азимута вектора анизотропии

Объем выборки – 575 точек дистанционного индуктивного зондирования

Fig. 2. Histograms of effective values of electrophysical characteristics of carbon-bearing sedimentary rocks in the Neryungri area:

а – attenuation coefficient of the high-frequency vertical magnetic dipole field at the frequency of 1.125 MHz, m⁻¹; б – specific attenuation of the high-frequency vertical magnetic dipole field at the frequency of 0.281 MHz, dB/m; в – electrical resistance at the frequency of 0.281 MHz, Ohm×m; г – dielectric permittivity at the frequency of 0.281 MHz, relative units; е – anisotropy coefficient at the frequency of 0.281 MHz, relative units; ф – azimuth numbers of the anisotropy vector

The sample size is 575 remote inductive sounding points

лу, состоящему из 575 значений, невелика и составляет 19,5 %. Такие минимально низкие значения затухания поля ВВМД соответствуют

монолитным скальным песчаникам средней – прочной категорий прочности с редким включением незначительных по мощности просло-



ев и слоев глинистых алевролитов, углистых аргиллитов и углей. В прогнозируемом водонасыщенном состоянии прочность таких песчаников изменяется от 49,65 до 218,04 МПа при средних значениях 74,65–100 МПа.

Вторая группа занимает среднюю часть гистограммы с равномерным распределением повышенных значений затухания поля ВВМД в широком интервале 1,72–2,98 м⁻¹. Каждое во второй группе среднеинтервальное значение появляется с вероятностью 3–5 %. В целом доля значений второй группы составляет 35,3 % и соответствует разуплотненным тектоническими процессами песчаникам средней категории прочности. В этой категории прочность в прогнозируемом водонасыщенном состоянии изменяется от 23,65 до 49,22 МПа при средних значениях 33,71–40 МПа. Признак равномерного вероятностного распределения значений затухания поля ВВМД и соответствующих им значений прочности позволяет рассматривать их как фоновые значения¹² для изученной центральной части г. Нерюнгри.

Третья самая многочисленная группа с долевым участием 45,2 % расположена в конце гистограммы в полосе высоких значений затухания поля ВВМД, равных 3,16–4,24 м⁻¹, со средним модальным значением максимума гистограммы, равным 3,7 м⁻¹. Широкий максимум вносит элемент неопределенности, объединяя в единое целое в прогнозируемом водонасыщенном состоянии скальные песчаники средней категории прочности (15–23,35 МПа) и полускальные песчаники малой (5–15 МПа) и пониженной (3–5 МПа) прочности. Детальный вариационный анализ показывает, что разделение скально-полускальных песчаников происходит по значению, равному 3,76 м⁻¹.

Электромагнитное возбуждение с применением более низкой частоты 0,281 МГц и изучением в восьми азимутах среднего удельного затухания поля ВВМД кардинально сгладило реакцию углеводещающих осадочных пород и сделало ее интегрально-упорядоченной, а значит, и более предсказуемой, закономерной при решении задач прогнозного районирования. Вид этой реакции показан на гистограмме (см. рис. 2, *b*). Широкий максимум гистограммы охватывает 76,9 % значений, сконцентрированных возле значения 3,2 дБ/м в интервале 1,97–4,03 дБ/м. Аномально высокие значения 4,44–6,5 дБ/м, соответству-

ющие скальным песчаникам прочной категории (75,65–203,17 МПа), встречаются редко и составляют 6,6 %. Существенно чаще встречаются аномально низкие значения 0,32–1,55 дБ/м, идентифицирующие полускальные песчаники пониженной и малой категорий прочности (3,21–12,21 МПа). Доля таких сильно разуплотненных тектоническими процессами песчаников и/или песчаников с большим содержанием малопрочных литогенных пород (глинистых алевролитов, углистых аргиллитов и углей) составляет 16,5 %.

Простая интегрированная вероятностная структура, которая отражает предсказуемую реакцию углеводещающих осадочных пород на их электромагнитное возбуждение, прослеживается и для остальных электрофизических характеристик (см. рис. 2, *c–f*). Попарное сравнение гистограмм позволяет обнаружить общие черты в законах ненормального вероятностного распределения значений электросопротивления и диэлектрической проницаемости (см. рис. 2, *c, d*) и коэффициента и азимута вектора анизотропии (см. рис. 2, *e, f*). У первой пары характеристик максимумы гистограмм сдвинуты в сторону меньших значений, а у второй пары – в сторону начальных значений.

Отчетливые максимумы гистограмм со среднеинтервальными значениями на частоте 0,281 МГц, равными 680–946 Ом*м и 5,4–6,1 отн. ед., предлагается рассматривать как опорные вероятностные реперы фоновых модальных значений электросопротивления и диэлектрической проницаемости горизонта трещиноватых углеводещающих осадочных пород на глубине 6–18 м. Высокие (1213–2144 Ом*м) и низкие 4–4,7 отн. ед.) среднеинтервальные значения соответствуют прочным категориям песчаников и встречаются редко. Также редко встречаются низкие (148–547 Ом*м) и высокие (9–14,8 отн. ед.) значения, соответствующие малопрочным категориям песчаников с включением генетически слабых осадочных пород.

Гистограммы с одинаковыми экспоненциальными распределениями значений коэффициента и азимута вектора анизотропии (см. рис. 2, *e, f*) важны тем, что обнаруживают важную для дальнейшего понимания результатов факторного анализа связь этих ценных для инженерно-геологического районирова-

¹² Они оцениваются по медианному среднему показателю и равны 4,41 м⁻¹ и 32,36 МПа.



ния характеристик. По мере нарастающей силы эффекта анизотропии с постепенным увеличением среднеинтервальных значений коэффициента анизотропии от 1,1 до 3,88 отн. ед. происходит поворот вектора анизотропии в сторону с большими дискретными значениями азимутальных номеров (от 1 до 8). Попутно объясним в табл. 1 номера азимутальных направлений.

Перейдем к обсуждению статистик вероятностных распределений электрофизических характеристик углеводосодержащих осадочных пород.

Сводная описательная статистика этих характеристик приведена в табл. 2. Применительно к основной задаче факторного анализа¹³ главной статистикой служит коэффициент вариации, который информирует об интегральной изменчивости электрофизических характеристик в заданном доверительном интервале, равном 95 %. На этом высоком уровне доверия к данным метода ДИЗ степе-

нь изменчивости исследуемых характеристик является высокой и еще раз подтверждает сложное неоднородное строение толщи углеводосодержащих осадочных пород и сильную изменчивость ее верхней части состава и физико-механических свойств. В сравнительно максимальной степени эти природные черты находят свое выражение в коэффициенте вариации азимута анизотропии (100 %), в минимальной степени – в диэлектрической проницаемости (57,6 %). В целом, судя по фоновым значениям электрофизических характеристик, оцененных по медианному среднему показателю¹⁴, углеводосодержащие осадочные породы находятся в не до конца разуплотненном разрушенном состоянии в результате действия в прошлые геологические эпохи тектонических и экзогенных и криогенных процессов, а в настоящее время – техногенных и антропогенных процессов. В противном случае фон затухания поля ВВМД в породах был бы не около 3 дБ/м, а значительно выше. Существенно

Таблица 1. Номера, направления и секторальные углы азимута вектора анизотропии удельного затухания поля высокочастотного вертикального магнитного диполя на частоте 0,281 МГц
Table 1. Numbers, directions, and sector azimuth angles of the anisotropy vector of the specific attenuation of a high-frequency vertical magnetic dipole field at a frequency of 0.281 MHz

Номер азимута	Направление	Углы, град.
1-й и 5-й	Север – юг	0 (360) и 180
2-й и 6-й	Северо-восток – юго-запад	45 и 225
3-й и 7-й	Восток – запад	90 и 270
4-й и 8-й	Юго-восток – северо-запад	135 и 315

Таблица 2. Описательная статистика характеристик углеводосодержащих осадочных пород
Table 2. Descriptive statistics of coal-bearing sedimentary rock characteristics

Статистика	Электрофизическая характеристика					
	1	2	3	4	5	6
Среднее арифметическое	2,78	2,82	851	6,6	1,7	4
Медианное среднее (фон)	2,89	2,88	809	6,2	1,6	4
Модальное среднее	3,28	3,87	757	5,5	1,3	2
Стандартное отклонение	1,88	2,16	682	3,8	1,2	4
Коэффициент вариации, %	67,6	76,6	80,1	57,6	70,6	100
Минимальное значение	1,44	0,11	81	3,6	1	1
Максимальное значение	4,33	6,71	2211	15,2	4	8
Количество точек дистанционного индуктивного зондирования	575	575	575	575	575	575

Примечание. 1 – коэффициент затухания поля высокочастотного вертикального магнитного диполя, м⁻¹; 2 – удельное затухание поля высокочастотного вертикального магнитного диполя, дБ/м; 3 – электросопротивление, Ом*м; 4 – диэлектрическая проницаемость, отн. ед.; 5 – коэффициент анизотропии, отн. ед.; 6 – номер азимута вектора анизотропии.

¹³ Задаче районирования территории г. Нерюнгри по благоприятным и неблагоприятным условиям строительства и эксплуатации инженерных сооружений.

¹⁴ Он более надежен для корректной оценки центра тяжести ненормальных вероятностных распределений с любым размером выборочной совокупности фактического материала.



выше были бы и фоновые значения диэлектрической проницаемости (выше 10 отн. ед.)

Обсуждение результатов факторного анализа начнем с представления табл. 3. В ней приведены значения параметрического коэффициента корреляции Пирсона в допущении, что все электрофизические характеристики связаны линейными вероятностными отношениями. Значения коэффициента Пирсона мало чем отличаются от значений непараметрических коэффициентов¹⁵ Кендалла и Спирмена, по которым была оценена возможность нелинейных вероятностных отношений между характеристиками.

Из корреляционной матрицы (см. табл. 3) следует, что линейная – нелинейная парная связь коэффициентов корреляции 0,801 существует между динамическими характеристиками электромагнитного взаимодействия углевмещающих осадочных пород с полем ВВМД на частоте 1,125 и 0,281 МГц. Существенно меньшая по силе парная обратная связь с коэффициентом корреляции -0,492 существует у базовых в теории электродинамики сплошных сред статических характеристиках электромагнитного взаимодействия: электропроводности и диэлектрической проницаемости. В остальных вариантах парных сопоставлений электрофизических характеристик связи нет. Это формальное заключение не означает, что связи на самом деле нет. Связь есть, но она проявляет себя только после подавления разнонаправленных случайных помех. Результаты этих исследований планируются опубликовать в ближайшем будущем.

Отмеченные выше связи важны в технологическом и геоинформационном аспектах.

Первая связь позволяет осуществлять взаимнообратные корреляционно-регрессионные переходы с целью оценки на одной и той же

глубине (6–18 м) затухания в углевмещающих осадочных породах поля ВВМД на частоте 1,125 или 0,281 МГц. При этом наибольшую практическую ценность имеет задача оценки трудноопределяемой характеристики среднего в восьми азимутах удельного затухания поля ВВМД на частоте 0,281 МГц по легко определяемым в одном азимуте значениям коэффициента монотонного затухания поля ВВМД на частоте 1,125 МГц. С точки зрения снижения трудозатрат при производстве полевых работ методом ДИЗ ценна и вторая связь, позволяющая оценивать диэлектрическую проницаемость по электросопротивлению на частоте 0,281 МГц. Ранее эта связь была изучена на частоте 1,125 МГц [35].

Перейдем к анализу факторов, но прежде немного коснемся теории факторного анализа. Согласно теории, каждый фактор, выделенный с помощью того или иного метода, представляет собой общую скрытую (латентную) причину, оказывающую влияние на определенную группу переменных¹⁶. Значения фактора носят относительный характер и изменяются в диапазоне от -1 до +1. Нулевое значение фактора для того или иного отдельного объекта исследования (например, точки ДИЗ) указывает на отсутствие статистически значимого отклонения от среднего уровня совокупной изменчивости переменных в ту или другую сторону. Проще говоря, нулевое значение разделяет исследуемое пространство на две пограничные части. В первой части с положительными значениями влияние фактора усиливается, а во второй части с отрицательными значениями влияние фактора ослабевает.

При решении задачи районирования территории г. Нерюнгри положительные значения отдельных факторов могут соответствовать

Таблица 3. Корреляционная матрица характеристик углевмещающих осадочных пород
Table 3. Correlation matrix of coal-bearing sedimentary rock characteristics

Номер характеристики	1	2	3	4	5	6
1	1	0,801	-0,21	0,066	0,039	0,061
2	0,801	1	-0,244	0,095	0,035	0,057
3	-0,21	-0,244	1	-0,492	-0,009	-0,032
4	0,066	0,095	-0,492	1	-0,057	0,017
5	0,039	0,035	-0,009	-0,057	1	-0,041
6	0,061	0,057	-0,032	0,017	-0,041	1

Примечание. Название номеров характеристик см. в примечании к табл. 2.

¹⁵ Не приводятся в данной статье.

¹⁶ Этот термин наиболее часто применяется в математической статистике.



как благоприятным, так и неблагоприятным условиям строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Аналогичная неоднозначность характерна и для отрицательных значений факторов на промежуточных этапах анализа. Эта неоднозначность обусловлена тем, что каждый фактор отражает лишь часть общей картины и может включать разнонаправленные показатели. Однако на завершающем этапе факторного анализа после построения итогового изображения результатов районирования интерпретация комплексных значений (вычисленных по всем шести факторам) становится однозначной. Положительные комплексные значения идентифицируют участки с неблагоприятными условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений, тогда как отрицательные значения указывают на благоприятные условия.

Наиболее сложной и ответственной задачей в рамках факторного анализа является корректное объяснение выделенных факторов и точная формулировка их наименований. Эта задача требует от исследователя глубоких разносторонних теоретических знаний в предметной области, понимания методов теории вероятности и математической статистики, а также большого практического опы-

та. В научной литературе данному аспекту уделяется недостаточное внимание: авторы зачастую создают у читателей иллюзию того, что компьютерное решение задач факторного анализа не требует особых усилий. Применительно к г. Нерюнгри формулировку названий факторов сделаем, опираясь на многолетний опыт изучения углевмещающих осадочных пород. Этот опыт был последовательно накоплен, начиная с 70–90-х гг. XX в. при производстве инженерно-геологических изысканий, опытно-производственных и экспериментальных работ методами геофизики. В их число входили метод вертикального электрического зондирования на постоянном электрическом токе, метод ДИЗ, сейсмический метод преломленных продольных и поперечных волн, а также метод дискретной и непрерывной георадиолокации.

Рассмотрение результатов факторного анализа начнем с содержания табл. 4 и 5. Данные, представленные в табл. 4, свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на совокупную изменчивость электрофизических характеристик углевмещающих осадочных пород оказывают четыре фактора с собственными значениями корреляционной матрицы, равными 2,011–0,947. Максимальную долю

Таблица 4. Собственные значения матрицы корреляции характеристик углевмещающих осадочных пород

Table 4. Eigenvalues of the correlation matrix of coal-bearing sedimentary rock characteristics

Номер фактора	Собственное значение матрицы	Процент общей дисперсии переменных	Кумулятивные собственные значения	Кумулятивный процент общей дисперсии
1	2,011	33,51	2,011	33,51
2	1,321	22,02	3,332	55,53
3	1,036	17,27	4,368	72,8
4	0,947	15,78	5,315	88,6
5	0,487	8,12	5,802	96,7
6	0,198	3,3	6	100

Таблица 5. Факторные нагрузки характеристик углевмещающих осадочных пород

Table 5. Factor loadings of coal-bearing sedimentary rock characteristics

Номер характеристики	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6
1	0,844	-0,418	-0,024	-0,1	-0,063	-0,313
2	0,862	-0,379	-0,016	-0,102	-0,05	0,316
3	-0,596	-0,607	-0,117	-0,085	-0,505	0,012
4	0,427	0,768	0,062	0,028	-0,473	-0,004
5	0,039	-0,21	0,703	0,676	-0,053	0,001
6	0,124	-0,017	-0,723	0,679	-0,007	0,002

Примечание. Название номеров характеристик см. в примечании к табл. 2.



процентного вклада в суммарную дисперсию (энергию) изменчивости электрофизических характеристик вносят первый (33,51 %) и второй факторы (22,02 %). Меньшие, но близкие доли влияния у третьего и четвертого факторов (17,27 и 15,78 %). У пятого и шестого факторов доля влияния резко снижается до 8,12 и 3,3 %.

Анализ динамики, приведенной на рис. 3, показывает геоинформационную незначительность пятого и шестого факторов. Приведенные на графике значения обозначают процентный вклад факторов в общую суммарную дисперсию исследуемых характеристик.

На первый взгляд незначительный геоинформационный вклад пятого и шестого факторов в суммарную дисперсию электрофизических характеристик углеводородных осадочных пород дает убедительное основание для сокращения числа факторов до четырех при решении задачи инженерно-геологического районирования территории г. Нерюнгри. Статистические критерии (Кайзера, Кеттела и др.) формально подтверждают возможность такого упрощения. Однако с научной точки зрения исключение факторов противоречит принципу полноты и разнообразия изучения геологической среды – ключевому требованию к исследованиям подобного рода. Для обеспечения максимальной достоверности и надежности итогового райо-

нирования необходимо учитывать все шесть факторов.

Значения факторных нагрузок электрофизических характеристик углеводородных осадочных пород представлены в табл. 5. Величина и знак значений нагрузок означают силу и направление корреляции характеристик с факторами. В научной практике принята следующая условная классификация значений факторных нагрузок: $[0-0,3]$ – пренебрежимо малые нагрузки (характеристики практически не связаны с фактором); $[0,3-0,4]$ – слабые нагрузки; $[0,4-0,5]$ – умеренные нагрузки; $[0,5-0,7]$ – средние нагрузки; $[0,7-0,8]$ – высокие нагрузки; $[0,8-1]$ – очень высокие нагрузки.

Динамика значений табл. 5 показана на рис. 4, построенном с помощью программы Statistica. Внутри окружностей с радиусом ± 1 отн. ед. (значений факторных нагрузок) показаны линии векторов с номерами характеристик углеводородных осадочных пород (см. табл. 2).

Попарная изменчивость значений факторных нагрузок, наблюдаемая на рис. 4, облегчает понимание реакции электрофизических характеристик в межфакторном пространстве, выделяя в нем наиболее чувствительные и информационно значимые характеристики. В первом факторе к таким характеристикам относятся однонаправленные характеристики затухания поля ВВМД с максимальными по значению и одинаковыми по знаку фак-

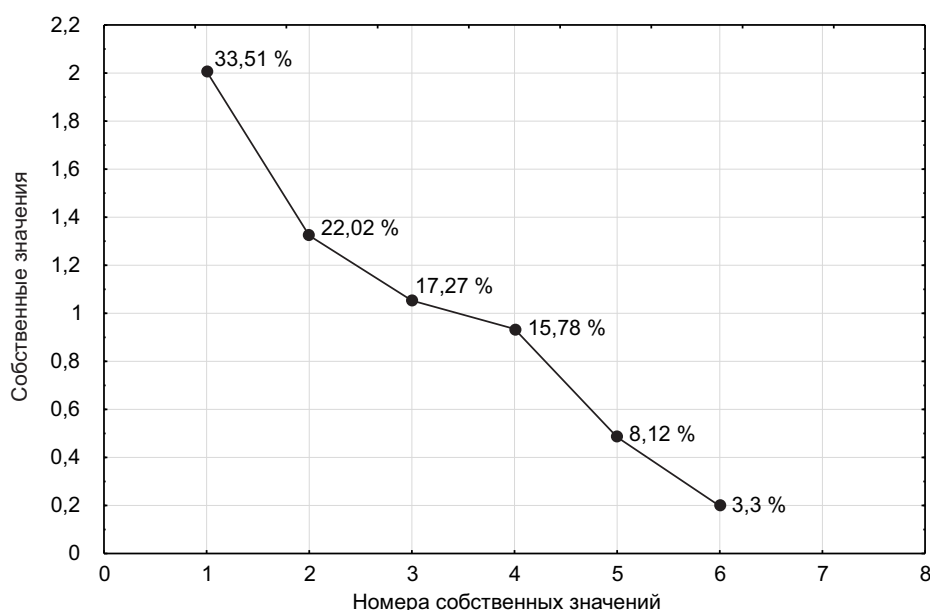


Рис. 3. График изменчивости собственных значений матрицы корреляции электрофизических характеристик углеводородных осадочных пород в основании инженерных сооружений на глубине 6–18 м

Fig. 3. Graph of the variability of eigenvalues of the correlation matrix for electrophysical characteristics of coal-bearing sedimentary rocks beneath engineering structures at a depth of 6–18 m

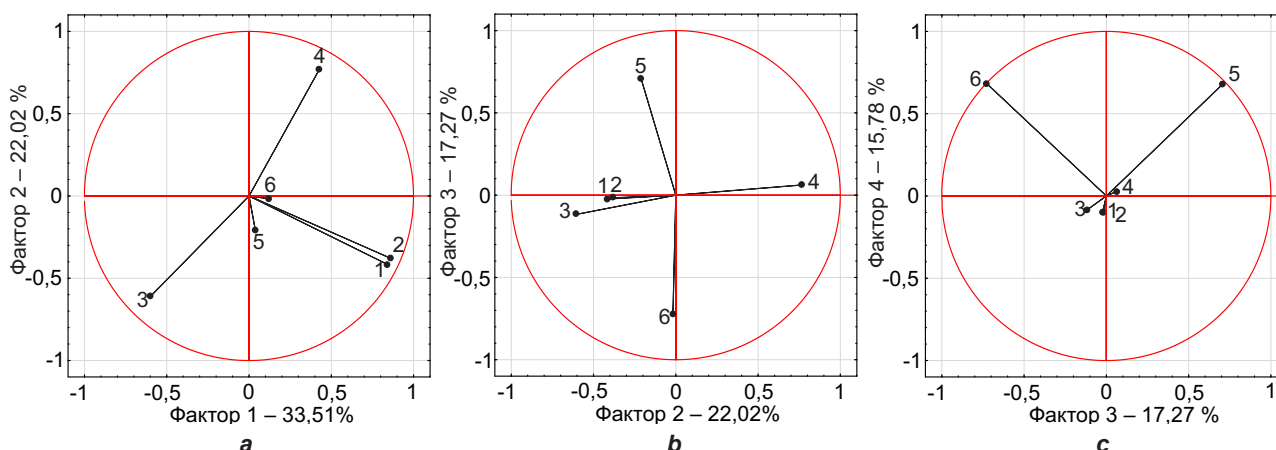


Рис. 4. Проекция нагрузок на комплексную плоскость первого – второго (а), второго – третьего (b) и третьего – четвертого факторов (с) с процентным вкладом в общую дисперсию изменчивости характеристик углевмещающих осадочных пород

Fig. 4. Loadings projections onto the complex plane for the first – second (a), second – third (b), and third – fourth factors (c), with the percentage contribution to the total variance of variability in the characteristics of coal-bearing sedimentary rocks

торными нагрузками, а также электросопротивление и диэлектрическая проницаемость с меньшими по значению и разными по знаку факторными нагрузками. Во втором факторе эти характеристики становятся лидирующими в сравнении с характеристиками затухания поля ВВМД. В третьем и четвертом факторах информационное первенство принадлежит исключительно характеристикам анизотропии затухания поля ВВМД. Такая информационно разнообразная картина обоснованно указывает на необходимость более полной комплексной оценки углевмещающих осадочных пород в разных аспектах их изучения.

Проанализируем факторы как геологические причины влияния на электрофизические характеристики углевмещающих осадочных пород.

Первый фактор планетарного масштаба назван разуплотнением. Он действует по всей Земле, изменяя ее внешний облик и внутреннее строение природными (эндогенными, экзогенными, криогенными, климатическими) и отчасти современными техногенными, антропогенными процессами. Природные планетарные процессы с полным правом можно назвать первопричиной изменения горных пород, сформировавшихся в прошлые геологические эпохи. В местном масштабе на территории г. Нерюнгри эта первопричина разуплотняет углевмещающие осадочные породы со снижением их прочности в основании инженерных сооружений на глубине 6–18 м. Это следствие, в свою очередь, становится фундаментальной причиной второго поряд-

ка в опосредованном процессе изменения по разветвленной иерархической цепочке причинно-следственной связи строения, состава, свойств и состояния углевмещающих осадочных пород.

Повышение – понижение значений первого фактора означает увеличение – уменьшение степени разуплотнения углевмещающих осадочных пород, а оно со своей стороны приводит к увеличению – уменьшению затухания поля ВВМД на частоте 1,125 и 0,281 МГц с факторными нагрузками 0,844 и 0,862 (см. табл. 5). Электросопротивление при увеличении – уменьшении разуплотнения пород умеренно снижается – повышается с факторной нагрузкой -0,609, а диэлектрическая проницаемость слабо повышается – понижается с факторной нагрузкой 0,438. Характеристики анизотропии в первом факторе не реагируют на изменение разуплотнения пород в большую или меньшую сторону.

Второй фактор изначально был ошибочно назван поляризацией, однако впоследствии ошибку исправили, заменив сугубо геофизический термин на корректный и точный геологический термин – литология. Второй фактор действует везде, где распространены осадочные породы. Применительно к территории г. Нерюнгри геологическое содержание и динамика второго фактора раскрываются в изменении в углевмещающей толще осадочных пород соотношения песчаников с глинистыми алевролитами, углистыми аргиллитами и каменными углями. Сдвиг в сторону увеличения количества и мощности этих образований со-



проводятся уменьшением значений второго фактора. Эта динамика соответствует увеличению диэлектрической проницаемости с факторной нагрузкой 0,768 и умеренному снижению электросопротивления с факторной нагрузкой -0,607 (см. табл. 5). При преобладании песчаников происходит рост значений второго фактора, генерирующий обратный процесс изменения указанных электрофизических характеристик. Зависящие от них дифференциальная и интегральная характеристики затухания поля ВВМД на частоте 1,125 и 0,281 МГц реагируют слабо и умеренно на изменение литологии углевмещающих осадочных пород. В песчаниках они снижаются, а в глинистых и углистых разностях осадочных пород повышаются с факторными нагрузками -0,418 и -0,379 (см. табл. 5). Характеристики анизотропии с маленькими и очень маленькими факторными нагрузками -0,21 и -0,017 не реагируют на изменение литологии.

Возникает вопрос: почему во втором факторе произошло кардинальное перераспределение значений факторных нагрузок в сторону диэлектрической проницаемости и в меньшей степени электросопротивления? Ведь известно, что функционально зависящие от них характеристики затухания любого типа электромагнитного поля сильнее реагируют на многообразное изменение геологической среды. В частности, на присутствие в осадочных породах глинистых алевролитов, углистых аргиллитов и каменных углей.

Ответ на поставленный вопрос находится не в плоскости физической причинно-следственной зависимости обозначенных электрофизических характеристик, а в плоскости далеко не всем физически понятных сложных математических алгоритмов, реализующих формально строгое и корректное решение задачи разделения исходных данных на факторные составляющие. В этой независимости от субъективного человеческого мнения и состоит научная объективная ценность методов факторного анализа. Результат применения факторного анализа акцентирует внимание на изменчивости статистически и информационно значимых характеристик электросопротивления и диэлектрической проницаемо-

сти, в которых наиболее выражено влияние фактора литологии. Безошибочный выбор этих статических характеристик, базовых в теории электродинамики, впечатляет. Именно через них проявляется сложнейший по своим нюансам физический процесс электрической поляризации, то есть реакция горных пород на возбуждение электрическими полями. В частности, на возбуждение высокочастотным гармоническим полем ВВМД мерзлых и немерзлых высокотемпературных, а также воздушно-сухих высокоомных¹⁷ углевмещающих осадочных пород. В этом аспекте характеристика диэлектрической проницаемости оказалась наиболее чувствительной к изменению литологии углевмещающих осадочных пород.

Третий и четвертый факторы названы трещиноватостью. Это весьма важный структурный фактор, по которому оценивается степень пространственной неоднородности горных пород. По своему познавательному содержанию данный фактор охватывает совокупность трещин различного происхождения и размеров.

Геологическая оценка степени трещиноватости учитывает густоту, ширину, протяженность, ориентацию трещин в пространстве и их генетический тип¹⁸. Все вместе взятое находит свое выражение в геофизической оценке по данным метода ДИЗ: электрической анизотропии среднего азимутального удельного затухания поля ВВМД в углевмещающих осадочных породах. Среди электрофизических характеристик коэффициент и азимут вектора анизотропии оказались единственными в своей исключительно высокой чувствительности к изменению не только степени, но и генезиса трещиноватости углевмещающих осадочных пород.

В третьем факторе увеличение числа литогенных трещин, связанных с диагенезом и катагенезом слоистой толщи углевмещающих осадочных пород, диагностируется по росту коэффициента анизотропии с высокой факторной нагрузкой 0,703 (см. табл. 5). Направление литогенной системы трещин (расслоения, усыхания, отседания и др.), ориентированных вдоль границ слоистости осадочных пород (песчаников, алевролитов, аргиллитов, углей), установлено по динамике азимута век-

¹⁷ Плохо проводящих электрический ток пород с электросопротивлением около 1000 Ом*м.

¹⁸ Литогенный (условия формирования горной породы), тектонический (движения земной коры); экзогенный (физическое и химическое выветривание и т. д.), криогенный (температура), техногенно-антропогенный (промышленные взрывы и пр.).



тора анизотропии в сторону уменьшения его номеров с высокой факторной нагрузкой, равной -0,723 (см. табл. 5). Согласно данным описательной статистики (см. табл. 2) и результатам гистограммного анализа (см. рис. 1, е, ф), система литогенной трещиноватости имеет преимущественную ориентацию с юго-запада на северо-восток. При этом модальное среднее значение азимутального номера составляет 2, а противоположного номера – 6 (см. табл. 1).

Структурно-тектоническая система трещиноватости обнаруживает себя в отрицательных значениях третьего фактора по двум признакам: уменьшению числа трещин и смене их ориентации на противоположное направление по отношению к ориентации литогенной сети трещин. Об уменьшении числа трещин и смене их ориентации свидетельствуют характеристики анизотропии. Коэффициент анизотропии снижается, а азимут анизотропии увеличивается. По данным описательной статистики (см. табл. 2), среднее медианное значение азимутального номера составляет 8. В сочетании с противоположным номером азимута, равным 4 (см. табл. 1, рис. 1), структурно-тектоническая система трещин ориентирована в направлении с юго-востока на северо-запад. Соответствующие секторальные углы составляют 135 и 315° (см. табл. 1).

Причина возникновения структурно-тектонической системы трещиноватости неизвестна, но предположительно объясняется пликативным тектоническим смятием сформировавшейся толщи углевмещающих осадочных пород в складчатую структуру – антиклиналь. По данным ООО «Нерюнгростройизыскания», толща углевмещающих осадочных пород в целом простирается с юго-запада на юго-восток. Продольная ось антиклинали вместе с небольшим числом трещин разрыва в сводовой части антиклинали по результатам факторного анализа простирается с юго-востока на северо-запад.

В четвертом факторе при повышении его значений проявляет себя разнонаправленная тектоническая система разрывной трещиноватости, возникшая после образования антиклинальной складки в результате деятельности мощных разнонаправленных тектонических процессов сжатия, растяжения и сдвига. Однако в целом ориентация этой очень сложной и, образно говоря, похожей на «разбитую тарелку» полигонально-блочной структуры трещи-

новатости согласуется с общей ориентацией продольных трещин разрыва в сводовой части антиклинали, то есть тех трещин, которые установлены в третьем факторе. Повышение трещиноватости фиксируется ростом коэффициента и азимута вектора анизотропии, и наоборот, с факторными нагрузками 0,676 и 0,67. Остальные электрофизические характеристики не реагируют на изменение трещиноватости. На участках с низкой тектонической трещиноватостью выходит из тени и проявляет себя система литологической послойной трещиноватости толщи углевмещающих осадочных пород со свойственной ей природной ориентацией с юго-запада на северо-восток.

Пятый и шестой факторы незначительно влияют на дисперсию (энергию) совокупной изменчивости электрофизических характеристик углевмещающих осадочных пород. Их общий вклад составляет 11,42 % (см. рис. 3). Тем не менее содержательное их значение как причины влияния на электрофизические характеристики интересно с точки зрения науки петрофизики. После перебора разных физически обусловленных вариантов названий факторов выбор был сделан на следующих названиях: пятый фактор был назван свойствами, а шестой – температурой.

Свойства в пятом факторе представлены песчано-глинистым материалом физического выветривания и льдистостью, которые действуют независимо друг от друга, но совместный результат их действия проявляется в изменении электросопротивления и диэлектрической проницаемости мерзлых – немерзлых трещиноватых углевмещающих осадочных пород. Результат влияния на указанные электрофизические характеристики весьма неоднозначен в неконтролируемом сочетании объемного соотношения в трещинах количества воздуха, песчано-глинистого материала и рассеянной структуры льдистости. На участках распространения высокотемпературных мерзлых осадочных пород с разновременным заполнением в прошлые геологические эпохи воздушных трещин глинистым материалом и изолированными пленками, вкраплениями трещинно-жильного или базального льда электросопротивление мерзлых осадочных пород снижается вместе с диэлектрической проницаемостью с умеренными факторными нагрузками -0,505 и -0,473 (см. табл. 5). При переходе из островной мерзлоты в немерзлые или техногенно-антропогенно талые осадоч-



ные породы льдистость из трещин исчезает, уступая место воздуху. Вследствие этого очень тонкого пограничного межфазового перераспределения увеличиваются диэлектрическая проницаемость и электрическое сопротивление осадочных пород, частично заполненных песчано-глинистым материалом.

В шестом факторе влияние температуры действует слабо и единственно на динамические электрофизические характеристики – затухание поля ВВМД. Однако это влияние неоднозначно. При повышении температуры в немерзлых или техногенно-антропогенно талых углеводородных осадочных породах затухание в них поля ВВМД на частоте 1,125 МГц слабо уменьшается с факторной нагрузкой -0,313, а на частоте 0,281 МГц – слабо повышается с факторной нагрузкой 0,316 (см. табл. 5). Такой разнонаправленной динамике физического объяснения не существует. Она объясняется разным способом оценки затухания поля ВВМД в окрестности точек ДИЗ. Сильноизменяемые в своей зависимости от физико-механических свойств углеводородных осадочных пород одноазимутальные значения затухания поля ВВМД, определенные на частоте 1,125 МГц, оказываются непригодными в тех случаях, когда возникает практическая необходимость количественно оценить температуру углеводородных осадочных пород в слое годовых теплооборотов на глубине 6–18 м. Более надежна для решения этой нетривиальной задачи геофизики интегральная характеристика – среднее удельное затухание поля ВВМД, определенное в восьми азимутах на частоте 0,281 МГц.

Исходя из физических соображений и практического опыта геологического истолкования результатов работ методом ДИЗ присвоим значениям рассмотренных шести факторов одну из двух категорий идентификаторов инженерно-геологических условий строительства и эксплуатации инженерных сооружений: благоприятную и неблагоприятную.

Результат присвоения представлен в табл. 6. Поясним содержание этой таблицы на примере. В качестве примера возьмем первый фактор, означающий разуплотнение углеводородных осадочных пород. Положительные значения фактора соответствуют увеличению степени разуплотнения пород с усилением главных информационных электрофизических характеристик – затухания поля ВВМД на частоте 1,125 и 0,281 МГц. Такие участки территории г. Нерюнгри неблагоприятны для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. В противном случае – благоприятны. Это эмпирическое правило по необходимости нарушается во втором факторе. В нем положительным значениям правильно присвоена благоприятная категория, так как этим значениям соответствуют высокое электросопротивление и низкая диэлектрическая проницаемость углеводородных осадочных пород, сложенных прочными песчаниками.

Во избежание неоднозначного понимания связи между значениями факторов и категориями изменим значения второго фактора на противоположные. После этого вычислим комплексное средневзвешенное значение по всем шести факторам, прини-

Таблица 6. Идентификация знака значений факторов по категориям строительства и эксплуатации инженерных сооружений

Table 6. Identification of the sign of factor values by categories of construction and operation of engineering structures

Номер фактора	Название фактора	Знак фактора	Категория
1	Разуплотнение	+ -	Неблагоприятная Благоприятная
2	Литология	+ -	Благоприятная Неблагоприятная
3	Трещиноватость литогенная	+ -	Неблагоприятная Благоприятная
4	Трещиноватость тектоническая	+ -	Неблагоприятная Благоприятная
5	Свойства (глинистость, льдистость)	+ -	Неблагоприятная Благоприятная
6	Температура	+ -	Неблагоприятная Благоприятная



мая во внимание методические рекомендации Г.С. Вахромеева¹⁹. В качестве весовых коэффициентов используем значения процентного вклада факторов в общую суммарную дисперсию электрофизических характеристик (см. табл. 4). По результатам расчета комплексного средневзвешенного значения факторов построена схема районирования центральной части г. Нерюнгри по инженерно-геологическим условиям строительства (благоприятные и неблагоприятные категории), представленная в виде цветного тонального изображения (рис. 5). Схема создана с помощью программы Surfer версии 8.0 (доступной для свободного использования). При построении схемы интерполяция комплексных значений факторов между точками ДИЗ сделана универсальным методом Криге (кригингом, *от англ.*: kriging по имени ученого-основателя D. Krige)²⁰.

Представленная на рис. 5 схема равномерного инженерно-геологического райони-

рования со всей очевидностью удостоверяет очень сложное неоднородное структурно-тектоническое строение и сильно изменчивое экзогенно-криогенное состояние природных мерзлых – немерзлых и техногенно-антропогенных талых углевещающих осадочных пород в основании инженерных сооружений на глубине 6–18 м. В этой схеме разные по размерам, форме и ориентации участки с благоприятно-неблагоприятными условиями чередуются между собой без какой-либо пространственной закономерности, образуя стохастически распределенную полигонально-блочную и вложенную в нее мозаично-ячеистую структуру, напоминающую «разбитую тарелку». Такая структура изначально сформировалась в прошлые геологические эпохи в результате многоэтапной, разномасштабной и разнонаправленной мгновенной (в короткие промежутки времени) деятельности тектонических процессов, а затем еще более усложнилась и потеряла черты регу-

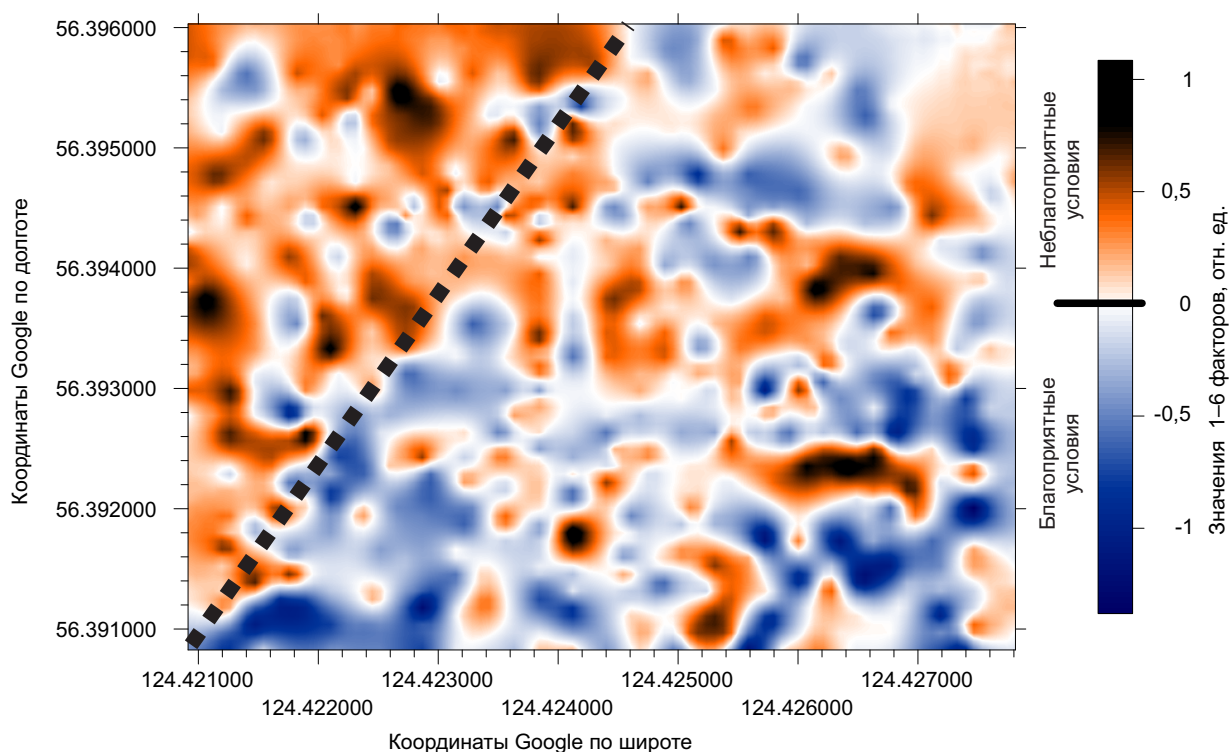


Рис. 5. Схема комплексного инженерно-геологического районирования с разделением центральной части территории г. Нерюнгри на участки с благоприятными и неблагоприятными условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений

Fig. 5. A diagram of comprehensive engineering and geological zoning, delineating areas in the central part of Neryungri with favorable and unfavorable conditions for engineering structure construction and operation

¹⁹ Вахромеев Г.С. Общие принципы комплексирования геофизических методов при поисках рудных месторождений: учеб. пособие. Иркутск, 1970. 119 с.

²⁰ С точки зрения усиления закономерных тенденций.



лярности, упорядоченности в результате действия не менее энергетически сильных в своем постоянном длительном действии экзогенных и криогенных процессов, включая процесс криогенного метаморфизма [32].

Несмотря на хаотичную картину распределения участков с разными условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений, при внимательном рассмотрении в этой картине обнаруживается едва заметный диагональный след, разделяющий территорию г. Нерюнгри на две части. Меньшая по площади верхняя часть расположена в северо-западном углу г. Нерюнгри, а нижняя часть занимает всю остальную площадь. Природа границы неизвестна, но интуиция подсказывает, что она соответствует «залеченному» экзогенными процессами фрагменту линеамента тектонического разлома, разорвавшего толщу углевмещающих осадочных пород в северо-восточном направлении, то есть по линии ее простираия.

Интересна и поучительна статистика процентного количества (выборочной вероятности) участков с благоприятными и неблагоприятными условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений, полученная по соответствующему знаку и числу комплексного значения факторов. В соответствии с этой статистикой вероятность встречи в центральной части г. Нерюнгри участков с благоприятными и неблагоприятными условиями практически одинакова и составляет 47,5 и 52,5 %. Если руководствоваться числом относительно аномальных комплексных значений факторов в интервалах от -0,5 до -1,528 и от 0,5 до 1,115 отн. ед., то вероятность встречи участков с весьма благоприятными и весьма неблагоприятными условиями также практически одинакова и составляет 15,5 и 14,1 % соответственно. Таким образом, по результатам факторного анализа преобладающая часть изученной территории г. Нерюнгри оценивается как пригодная для продолжения на ней строительства и безопасной эксплуатации инженерных сооружений. При возникнове-

нии необходимости²¹ потенциально опасные участки площади с весьма неблагоприятными условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений (комплексное значение факторов превышает 0,5 отн. ед.), сложенные углевмещающими осадочными породами малой, пониженной и низкой прочности²² («рухляками» и «разборной скалой»), легко найти по координатам точек ДИЗ. Так, например, один из участков с весьма неблагоприятными условиями (максимальное комплексное значение факторов равно 1,115 отн. ед.) находится в микрорайоне К в точке ДИЗ № 45 с координатами Google, равными 124424118 и 56391793.

Заключение

Решение задачи инженерно-геологического районирования по данным метода ДИЗ с применением факторного анализа предлагается рассматривать как еще один результат теоретико-математического и технико-методического воплощения идеи Г.С. Вахромеева в разработанном им подходе решения задач поиска и разведки рудных полезных ископаемых с применением рационального комплекса геолого-геофизических методов^{23,24}. В конкретном случае научная сторона плодотворности развития этого универсального подхода выражается в замене комплекса методов геофизики совокупностью электрофизических характеристик углевмещающих осадочных пород, определенных одним методом ДИЗ. Со стороны геологических методов замена осуществлена факторами как отражением ранее скрытых от исследователя объективных геологических причин, влияющих в разных аспектах на электрофизические характеристики. Именно в этой особенности в наибольшей степени проявляется математическая мощь и научная ценность факторного анализа среди остальных методов многомерного вероятностно-статистического анализа. Более того, по значениям факторов можно решать задачи прогноза. Например, по значениям первого фактора оценивать на качественном уровне

²¹ Инвентаризации жилого фонда или организации мониторинговой сети по аварийным зданиям и сооружениям.

²² Предел прочности таких пород на одноосное сжатие в прогнозируемом водонасыщенном состоянии изменяется от 5–15 до 1–3 МПа.

²³ Вахромеев Г.С. Общие методы комплексирования геофизических методов при поисках рудных месторождений: учеб. пособие. Иркутск, 1970. 119 с.

²⁴ Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю. Комплексирование геофизических методов и физико-геологические модели: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1989. 87 с.



меру или степень разуплотнения углевмещающих осадочных пород не только на территории г. Нерюнгри, но и в порядке апробации решения этой задачи в застраиваемых районах Южной Якутии с близкими инженерно-ге-

ологическими условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений, то есть в мезозойских тектонических впадинах, сложенных толщей углевмещающих осадочных пород с доминированием песчаников.

Список источников

1. Шкабарня Н.Г., Шкабарня Г.Н., Яковлева А.В. Электрическая томография при исследовании геологической среды на участке нефтеперерабатывающего комплекса // Володинские чтения. 2012. № 80. С. 200–202. EDN: PHNTLJ.
2. Капустин В.В., Владов М.Л. Техническая геофизика. Методы и задачи // Геотехника. 2020. Т. 12. № 4. С. 72–85. DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85. EDN: SXGKPT.
3. Капустин В.В., Чуркин А.А. Применение динамических атрибутов акустического сигнала для оценки контакта свай с вмещающими грунтами // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2020. № 3. С. 126–137. DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-126-137. EDN: RRUBXA.
4. Соргутов И.В. Обследование оснований и фундаментов при помощи методов сейсморазведки // Системные технологии. 2021. № 4. С. 86–89. DOI: 10.55287/22275398-2021-4-86. EDN: EWKGAG.
5. Лазурченко А.В., Дмитриев А.Г., Миromanов А.В., Губанов А.Б. Опыт-методические геофизические и буровые работы для изучения геометрии, состояния и свойств скрытых фундаментов // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1. С. 50–64. DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64. EDN: XYILPH.
6. Логинов Д.С. Модели взаимодействия картографического и геоинформационного обеспечения // Геоинформатика. 2025. № 4. С. 90–102. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-90-102. EDN: NNWFKM.
7. Кричинский А.К., Поспеев А.В. Интеграция искусственного интеллекта в обработку геолого-геофизических данных при разведке твердых полезных ископаемых // Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 3. С. 310–320. DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320. EDN: WAUKUO.
8. Шиверский Г.В., Кривошеков С.Н. Перспективы применения методов искусственного интеллекта в нефтегазовой геологии // Master's Journal. 2022. № 2. С. 57–67. EDN: MXLKEW.
9. Царегородцева Т.К., Горкин Г.М. Применение искусственного интеллекта в разведке и добыче углеводородов // Недропользование XXI век. 2022. № 2. С. 12–15. EDN: FRHXVC.
10. Степанов И.Ю. Использование методов машинного обучения в геоинформационных моделях при решении задач геофизической разведки // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2024. Т. 29. № 2. С. 108–117. DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117. EDN: BHXCBY.
11. Jooshaki M., Nad A., Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry // Minerals. 2021. Vol. 11. Iss. 8. P. 816. DOI: 10.3390/min11080816.
12. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization // The Extractive Industries and Society. 2024. Vol. 17. P. 101440. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101440.
13. Прозорова Г.В., Сенкевич Л.Б. Использование больших языковых моделей в прикладных задачах нефтегазовой отрасли // Геоинформатика. 2025. № 4. С. 103–112. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-103-112. EDN: QIBBXO.
14. Ling C., Zhao X., Lu J., Deng C., Zheng C., Wang J., et al. Domain specialization as the key to make large language models disruptive: a comprehensive survey // arXiv. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2305.18703.
15. Петрушкин В.А. Методы и технологии искусственного интеллекта в геолого-геофизических исследованиях // Геоинформатика. 2025. № 3. С. 96–106. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-3-96-106. EDN: FUJUUW.
16. Dramsch J.S. 70 years of machine learning in geoscience in review // Advances in Geophysics. 2020. Vol. 61. P. 1–55. DOI: 10.1016/bs.agph.2020.08.002.
17. An Y., Du H., Ma S., Niu Y., Liu D., Wang J., et al. Current state and future directions for deep learning based automatic seismic fault interpretation: a systematic review // Earth-Science Reviews. 2023. Vol. 243. P. 104509. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104509.
18. Шестакова А.А. Современное состояние мерзлотных ландшафтов осваиваемых территорий Западной Якутии // Геоинформатика. 2025. № 4. С. 45–53. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-45-53. EDN: BDVNVS.
19. Савичев О.Г. Оценка заболоченности водосборов Томской области (Российская Федерация) при решении гидрологических и геоэкологических задач // Геоинформатика. 2025. № 2. С. 13–25. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-2-13-25. EDN: RKBFNO.
20. Пшеничников А.Е. Картографирование динамики ледников острова Большевик (Северная Земля) по космическим снимкам // Геоинформатика. 2025. № 2. С. 34–41. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-2-34-41. EDN: LHBJSZ.
21. Чупикова С.А., Чульдун А.Ф. Геоинформационные и дистанционные методы при оценке загрязнения снежного покрова (г. Кызыл) // Геоинформатика. 2023. № 1. С. 63–70. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-1-63-70. EDN: ZYTYWA.
22. Черемисина Е.Н., Любимова А.В., Добрынин Д.В., Горюнова Е.А., Каманина И.З. Разработка геоинформационной технологии комплексной оценки экологического риска здоровью населения на примере территории города Дубны // Геоинформатика. 2025. № 4. С. 12–22. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-12-22. EDN: MOZCLM.



23. Шамаева Е.Ф., Савватеева О.А., Головин А.А. Применение индекса устойчивого развития для мониторинга качества жизни: построение и интерпретация в ГИС на примере субъектов РФ // Геоинформатика. 2025. № 4. С. 23–36. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-23-36. EDN: NTCSUT.
24. Нерадовский Л.Г. Электромагнитная технология изучения прочности осадочных пород методом дистанционного индуктивного зондирования (на примере застроенных участков криолитозоны Южной Якутии): монография. М.: Изд-во АНО «Издательский дом «Научное обозрение», 2025. 286 с.
25. Нерадовский Л.Г. Инженерно-геологические возможности метода дистанционного индуктивного зондирования при изучении осадочных пород Южной Якутии (на примере железнодорожной станции Кюргеллях) // Геофизические исследования. 2026. Т. 27. № 2. С. 76–99. DOI: 10.21455/gr2026.2-4.
26. Труш Н.И., Чижов А.Б., Чижова Н.И. [и др.]. Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района. М.: Изд-во МГУ, 1975. 444 с.
27. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 226 с.
28. Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Геокриологические условия Токарикского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28. № 2. С. 261–274. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274. EDN: ZKESHR.
29. Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. Новосибирск: Наука, 1980. 119 с.
30. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-геологических условий (на примере Нерюнградской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, 1976. Вып. 15. С. 120–125.
31. Мокшанцев К.Б., Горнштейн Д.К., Гусев Г.С. [и др.]. Тектоническое строение Якутской АССР. М.: Наука, 1964. 291 с.
32. Шестернёв Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 265 с.
33. Нерадовский Л.Г. Разнообразие и предсказуемость изменений диэлектрической проницаемости песчаников Южной Якутии в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри // Геофизика. 2025. № 3. С. 58–66. DOI: 10.34926/geo.2025.11.42.008. EDN: RJHQJK.
34. Нерадовский Л.Г. Пространственные вариации электрического сопротивления выветренных и трещиноватых песчаников Южной Якутии в слое годовых теплооборотов (на примере г. Нерюнгри) // Геофизика. 2025. № 6. С. 16–24. DOI: 10.34926/geo.2025.41.77.005. EDN: LTSPDG.
35. Нерадовский Л.Г. Электросопротивление и диэлектрическая проницаемость песчаников Южной Якутии в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри (часть 1) // Геоинформатика. 2025. № 2. С. 42–52. DOI: 10.47148/1609-364X-2025-2-42-52. EDN: LRSINR.
36. Sun K., Chen Y., Geng G., Lu Z., Zhang W., Song Z., et al. A review of mineral prospectivity mapping using deep learning // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 10. P. 1021. DOI: 10.3390/min14101021.
37. Ma Z., Qiao Y., Jing M. Prospecting potential evaluation based on geological factor analysis – a case study of Jiaojiaocheng ore belt // Frontiers in Earth Science. Geohazards and Georisks. 2024. Vol. 12. DOI: 10.3389/feart.2024.1464429.
38. Esmaeiloghli S., Tabatabaei S.H., Carranza E.J.M., Hosseini S., Deville Y. Spatially-weighted factor analysis for extraction of source-oriented mineralization feature in 3D coordinates of surface geochemical signal // Natural Resources Research. 2021. Vol. 30. P. 3925–3953. DOI: 10.1007/s11053-021-09933-2.
39. Chen T., Han S., Yang Y., Song Z., Zeng Z. Application of robust factor analysis and robust regression analysis to identify the geochemical anomalies linked with mineralization in the Yinkeng Orefield, South China // Geosciences Journal. 2026. Vol. 30. P. 183–198. DOI: 10.1007/s12303-025-00081-w.
40. Вержбицкий В.В., Щекин А.И., Хандзель А.В., Гунькина Т.А. Применение методов факторного анализа для оценки эффективности геолого-технических мероприятий на скважинах подземных хранилищ газа // Вестник Евразийской науки. 2021. Т. 13. № 6. EDN: NZTIQL.

References

1. Shkabarnya N.G., Shkabarnya G.N., Yakovleva A.V. Electrical tomography study in geological environment on site oil complex. *Volodinskije chteniya*. 2012;80:200-202. (In Russ.). EDN: PHNTLJ.
2. Kapustin V.V., Vladov M.L. Technical geophysics. Methods and tasks. *Geotechnics*. 2020;12(4):72-85. (In Russ.). DOI: 10.25296/2221-5514-2020-12-4-72-85. EDN: SXGKPT.
3. Kapustin V.V., Churkin A.A. Applying of dynamic acoustic signal attributes for evaluation of the contact between pile and soils. *Moscow University Bulletin. Series 4. Geology*. 2020;3:126-137. (In Russ.). DOI: 10.33623/0579-9406-2020-3-126-137. EDN: RRUBXA.
4. Sorgutov I.V. Inspection of foundations and foundations using seismic methods. *System Technologies*. 2021;4:86-89. (In Russ.). DOI: 10.55287/22275398-2021-4-86. EDN: EWKGAG.
5. Lazurchenko A.V., Dmitriev A.G., Miromanov A.V., Gubanov A.B. Field trial geophysical and drilling works to study geometry, state and properties of hidden foundations. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(1):50-64. (In Russ.). DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-1-50-64. EDN: XYILPH.
6. Loginov D.S. Interaction models of cartographic and geoinformation support. *Geoinformatika*. 2025;4:90-102. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-90-102. EDN: NNWFKM.



7. Krichinsky A.K., Pospeev A.V. Integration of artificial intelligence into geological and geophysical data processing in solid minerals exploration. *Earth sciences and subsoil use*. 2025;48(3):310-320. (In Russ.). DOI: 10.21285/2686-9993-2025-48-3-310-320. EDN: WAUKUO.
8. Shiverskii G.V., Krivoschekov S.N. Prospects for the application of artificial intelligence methods in the geology of oil and gas. *Master's Journal*. 2022;2:57-67. (In Russ.). EDN: MXLKEW.
9. Tsaregorodtseva T.K., Gorkin G.M. Application of artificial intelligence in hydrocarbon exploration and production. *Nedropol'zovanie XXI vek*. 2022;2:12-15. (In Russ.). EDN: FRHXVC.
10. Stepanov I.Y. The use of machine learning methods in geoinformation models in solving problems of geophysical exploration. *Vestnik SSUGT (Siberian State University of Geosystems and Technologies)*. 2024;29(2):108-117. (In Russ.). DOI: 10.33764/2411-1759-2024-29-2-108-117. EDN: BHXCBY.
11. Jooshaki M., Nad A., Michaux S. A systematic review on the application of machine learning in exploiting mineralogical data in mining and mineral industry. *Minerals*. 2021;11(8):816. DOI: 10.3390/min11080816.
12. Corrigan C.C., Ikonnikova S.A. A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*. 2024;17:101440. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101440.
13. Prozorova G.V., Senkevich L.B. On the use of large language models in applied tasks of the oil and gas industry. *Geoinformatika*. 2025;4:103-112. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-103-112. EDN: QIBBXO.
14. Ling C., Zhao X., Lu J., Deng C., Zheng C., Wang J., et al. Domain specialization as the key to make large language models disruptive: a comprehensive survey. *arXiv*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2305.18703.
15. Petrushkin V.A. Artificial intelligence methods and technologies in geological and geophysical. *Geoinformatika*. 2025;3:96-106. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-3-96-106. EDN: FUIJUW.
16. Dramsch J.S. 70 years of machine learning in geoscience in review. *Advances in Geophysics*. 2020;61:1-55. DOI: 10.1016/bs.agph.2020.08.002.
17. An Y., Du H., Ma S., Niu Y., Liu D., Wang J., et al. Current state and future directions for deep learning based automatic seismic fault interpretation: a systematic review. *Earth-Science Reviews*. 2023;243:104509. DOI: 10.1016/j.earscirev.2023.104509.
18. Shestakova A.A. Current state of permafrost landscapes in the developed territories of Western Yakutia. *Geoinformatika*. 2025;4:45-53. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-45-53. EDN: BDVNVS.
19. Savichev O.G. Assessment of swampiness of river basins in the Tomsk Region (Russian Federation) when solving hydrological and geocological problems. *Geoinformatika*. 2025;2:13-25. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-2-13-25. EDN: RKBFO.
20. Pshenichnikov A.E. Mapping of glacier dynamics of Bolshevik Island (Severnaya Zemlya) by space images. *Geoinformatika*. 2025;2:34-41. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-2-34-41. EDN: LHBJSZ.
21. Chupikova S.A., Chuldum A.F. Geoinformation and remote methods for assessing snow cover pollution (Kyzyl). *Geoinformatika*. 2023;1:63-70. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2023-1-63-70. EDN: ZYTYWA.
22. Cheremisina E.N., Lyubimova A.V., Dobrynin D.V., Goryunova E.A., Kamanina I.Z. Development of geoinformation technology for comprehensive assessment of environmental risk to public health on the example of the territory of the city of Dubna. *Geoinformatika*. 2025;4:12-22. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-12-22. EDN: MOZCLM.
23. Shamaeva E.F., Savvateeva O.A., Golovin A.A. Application of the sustainable development index for monitoring quality of life: construction and interpretation in GIS using Russian Federation regions as a case study. *Geoinformatika*. 2025;4:23-36. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-4-23-36. EDN: NTCSUT.
24. Neradovskii L.G. *Electromagnetic technology for sedimentary rock strength assessment using remote inductive sounding (the case of built-up areas in the cryolithozone of Southern Yakutia)*. Moscow: Izdatel'skii dom "Nauchnoe obozrenie"; 2025, 286 p. (In Russ.).
25. Neradovskii L.G. Engineering and geological capabilities of the remote inductive sensing method in the study of sedimentary rocks in southern Yakutia (using the example of the Kyurgekyakh railway station). *Geophysical Research*. 2026;27(2):76-99. (In Russ.). DOI: 10.21455/gr2026.2-4.
26. Trush N.I., Chizhov A.B., Chizhova N.I. *Southern Yakutia: permafrost-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1975, 444 p. (In Russ.).
27. Zhelezniak M.N. *Geotemperature field and permafrost zone in the south-eastern Siberian Platform*. Novosibirsk: Nauka; 2015, 226 p. (In Russ.).
28. Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgra grabens (South Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(2):261-274. (In Russ.). DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274. EDN: ZKESHR.
29. Zhelinskii V.M. *Mesozoic coal-bearing formation of Southern Yakutia*. Novosibirsk: Nauka; 1980, 119 p. (In Russ.).
30. Buldovich S.N., Melentiev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. The role of recent faults in the formation of permafrost-hydrogeological conditions (on the example of the Neryungri syncline of the Southern Yakutian Mesozoic trough). In: *Permafrost Research*. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 1976, vol. 15, p. 120-125. (In Russ.).
31. Mokshantsev K.B., Gornshtein D.K., Gusev G.S., et al. *Tectonic structure of the Yakut ASSR*. Moscow: Nauka; 1964, 291 p. (In Russ.).
32. Shesternev D.M. *Cryohypergenesis and geotechnical properties of permafrost rocks*. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2001, 265 p. (In Russ.).
33. Neradovskii L.G. Diversity and predictability of the variability of the dielectric constant of sandstones of South Yakutia in the annual heat turnover layer of the city of Neryungri. *Geophysics*. 2025;3:58-66. (In Russ.). DOI: 10.34926/geo.2025.11.42.008. EDN: RJHQJK.



34. Neradovskii L.G. Spatial variations of the electrical resistivity of weathered and fractured sandstones of South Yakutia in the annual heat turnover layer (using the example of Neryungri). *Geophysics*. (In Russ.). DOI: 10.34926/geo.2025.41.77.005. EDN: LTSPDG.

35. Neradovskii L.G. Electrical resistance and dielectric permittivity of sandstones of South Yakutia at the base of engineering structures in Neryungri (Part 1). *Geoinformatika*. 2025;2:42-52. (In Russ.). DOI: 10.47148/1609-364X-2025-2-42-52. EDN: LRSINR.

36. Sun K., Chen Y., Geng G., Lu Z., Zhang W., Song Z., et al. A review of mineral prospectivity mapping using deep learning. *Minerals*. 2024;14(10):1021. DOI: 10.3390/min14101021.

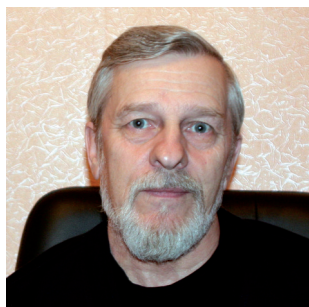
37. Ma Z., Qiao Y., Jing M. Prospecting potential evaluation based on geological factor analysis – a case study of Jiaojiaocheng ore belt. *Frontiers in Earth Science. Geohazards and Georisks*. 2024;12. DOI: 10.3389/feart.2024.1464429.

38. Esmaeiloghli S., Tabatabaei S.H., Carranza E.J.M., Hosseini S., Deville Y. Spatially-weighted factor analysis for extraction of source-oriented mineralization feature in 3D coordinates of surface geochemical signal. *Natural Resources Research*. 2021;30:3925-3953. DOI: 10.1007/s11053-021-09933-2.

39. Chen T., Han S., Yang Y., Song Z., Zeng Z. Application of robust factor analysis and robust regression analysis to identify the geochemical anomalies linked with mineralization in the Yinkeng Orefield, South China. *Geosciences Journal*. 2026;30:183-198. DOI: 10.1007/s12303-025-00081-w.

40. Verzhbitsky V.V., Shchekin A.I., Handzel A.V., Gunkina T.A. Applying factor analysis methods to assess the efficiency of well interventions at underground gas storage facilities. *The Eurasian Scientific Journal*. 2021;13(6). (In Russ.). EDN: NZTIQL.

Информация об авторе / Information about the author



Нерадовский Леонид Георгиевич,

доктор технических наук,
заслуженный деятель науки Республики Саха (Якутия),
старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии,
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН,
г. Якутск, Российская Федерация,

✉ L031950N@ya.ru

РИНЦ Author ID: 394470

Scopus Author ID: 7344126100

Leonid G. Neradovskii,

D.Sc. in Engineering,
Honored Scientist of the Republic of Sakha (Yakutia),
Senior Researcher of the Laboratory of Engineering Geocryology,
Melnikov Permafrost Institute,
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Yakutsk, Russian Federation,

✉ 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 conflict 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 11.05.2026; одобрена после рецензирования 03.09.2026; принята к публикации 10.09.2026.

The article was submitted 11.05.2026; approved after reviewing 03.09.2026; accepted for publication 10.09.2026.