

Геоинформатика. 2025. № 2. С. 42–52.

Geoinformatika. 2025;(2):42–52.

Информационные системы в геологии и геофизике

Научная статья

УДК 550.372+552.08

<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-42-52>

Электросопротивление и диэлектрическая проницаемость песчаников Южной Якутии в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри (часть 1)

© 2025 г. — Леонид Георгиевич Нерадовский

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; Якутск, Россия

L031950N@ya.ru

Аннотация: Методом дистанционного индуктивного зондирования изучена изменчивость в слое годовых теплооборотов эффективных значений электрофизических свойств песчаников Южной Якутии, слагающих основания инженерных сооружений в г. Нерюнгри. В верхней выветренной части песчаников на глубине 0–5 м фоновые значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости равны 856 Ом·м и 6,4 отн. ед. В нижней трещиноватой части песчаников фоновые значения на глубине 5–14 м меньше и равны 1538 Ом·м и 4,8 отн. ед. Пространственная изменчивость значений электрофизических свойств песчаников, как и их прочность, корректно описываются законом Вейбулла. Информационная емкость диэлектрической проницаемости при изучении изменчивости по глубине степени уплотнения и структурно-прочностной консолидации песчаников существенно ниже электросопротивления. Совместное их использование повышает геологическую информативность и дает основание принять решение о том, что по отношению к выветренным песчаникам, залегающим на глубине 0–5 м, степень уплотнения и структурно-прочностной консолидации трещиноватых песчаников, залегающих на глубине 5–14 м, увеличивается в 1,3–1,8 раз. Такая ранее неизвестная в инженерной геологии и грунтоведении оценка степени уплотнения и консолидации песчаников впервые получена в слое годовых теплооборотов методом геофизики на застроенной территории Южной Якутии.

Ключевые слова: г. Нерюнгри; слой годовых теплооборотов; песчаники; степень уплотнения и структурно-прочностной консолидации; эффективные значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости; метод дистанционного индуктивного зондирования; глубина 0–5 и 5–14 м.

Для цитирования: Нерадовский Л.Г. Электросопротивление и диэлектрическая проницаемость песчаников Южной Якутии в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри (часть 1) // Геоинформатика. — 2025. — № 2. — С. 42–52. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-42-52>.

Information systems in geology and geophysics

Original article

Electrical resistance and dielectric permittivity of sandstones of South Yakutia at the base of engineering structures in Neryungri (part 1)

© 2025 — Leonid G. Neradovskii

Melnikov Permafrost Institute SB RAS; Yakutsk, Russia

L031950@ya.ru

Abstract: The variability in the annual heat turnover layer of the effective values of the electrophysical properties of sandstones of South Yakutia, which form the foundations of engineering structures in Neryungri, has been studied by remote inductive sensing. In the upper weathered part of the sandstones at a depth of 0–5 m, the background values of electrical resistance and dielectric constant are 856 ohms·m and 6.4 rel.units. In the lower fractured part of the sandstones, the background values at a depth of 5–14 m are less than and equal to 1538 Ohms·m and 4,8 rel.units. The spatial variability of the values of the electrophysical properties of sandstones, as well as their strength, are correctly described by Weibull's law. The information capacity of the dielectric constant in studying the variability in depth of the degree of compaction and structural strength consolidation of sandstones is significantly lower than the electrical resistance. Their combined use increases the geological information content and gives reason to decide that in relation to weathered sandstones lying at a depth of 0–5 m, the degree of compaction and structural strength consolidation of fractured sandstones lying at a depth of 5–14 m increases by 1,3–1,8 times. Such an assessment of the degree of compaction and consolidation of sandstones, previously unknown in engineering geology and soil science, was first obtained in the annual heat turnover layer by geophysics in the built-up area of South Yakutia.

Key words: Neryungri city; annual heat turnover layer; sandstones; degree of compaction and structural strength consolidation; effective values of electrical resistance and dielectric constant; remote inductive sensing method; depth 0–5 and 5–14 m.

For citation: 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. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-42-52>. In Russ.

Введение

Изучение электрофизических свойств горных пород всегда было приоритетным научным занятием в аспектах количественной оценки двух характеристик. Это — электрическое сопротивление (далее — электросопротивление) и вещественная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости (далее — диэлектрическая проницаемость). Оценка этих характеристик обычно выполняется в лабораториях на образцах пород и в скважинах, пробуренных в массивах пород.

В настоящее время акцент исследований электросопротивления и диэлектрической проницаемости сместился на осадочные породы, содержащие нефть и газ. Работ в этом направлении много, но среди них отметим редкую по своей многогранности и основательности работу Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука (ИННГ СО РАН) [1]. В ней дано обобщение теоретико-методических и аппаратурно-технологических результатов изучения диэлектрической проницаемости нефти и газосодержащих осадочных пород, полученных методами геоэлектрики на переменном токе. Информационно-познавательный интерес представляют также работы М.А. Иноземцева [2] и А.У. Касимова, С.Н. Верзунова [3] с точки зрения рассмотрения методов лабораторного определения диэлектрической проницаемости образцов горных пород.

В отличие от работ по изучению с поверхности земли методами геоэлектрики электросопротивления горных пород, количественная оценка диэлектрической проницаемости определяется методом георадиолокации. Результаты решения этой ставшей уже стандартной задачи опубликованы в работах М.Л. Владова, А.В. Старовойтова, А.В. Омеляненко, Л.Л. Федоровой и многих других ученых. Исключительно важное значение для количественной оценки диэлектрической проницаемости по данным георадиолокации имеет программа Р.Р. Денисова «Георадар-Эксперт» [4]. С ее помощью успешно изучается изменчивость по латерали и глубине значений диэлектрической проницаемости горных пород. В скважинах диэлектрическая проницаемость горных пород изучается георадиолокацией эпизодически. Так, в работе Г.А. Куляндина и др. [5] рассмотрен результат георадиолокации диэлектрической проницаемости обводненных песчано-глинистых отложений. Результат получен на частоте 50 МГц в тестовой скважине на испытательном полигоне ИННГ СО РАН им. А.А. Трофимука.

В настоящей статье объектом научных исследований служит углеводородная толща осадочных пород Южной Якутии, слагающая на территории г. Нерюнгри скально-полускальное основание ин-

женерных сооружений, построенных и эксплуатируемых на ленточных и столбчатых фундаментах. Предметом научных исследований в статье являлось изучение эффективных значений (далее — значений) электросопротивления и диэлектрической проницаемости массива песчаников, который преимущественно распространен в углеводородной толще осадочных пород как в г. Нерюнгри, так и на всей территории Южной Якутии. Изучение электрофизических характеристик песчаников проведено с поверхности земли с помощью метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ).

Редко объясняемые в научно-технической литературе сопряженные понятия «эффективное» и «кажущееся»¹ сопротивления и диэлектрическая проницаемость означают обобщенную оценку неоднородной и анизотропной геологической среды до глубины ее изучения электрическим полем на постоянном или переменном токе. Под этой оценкой при изучении электросопротивления выдающийся ученый-геофизик В.Н. Дахнов понимал среднее значение. Однако при этом он не объяснял какое это значение: арифметическое, медианное, геометрическое или иное [6]. Ю.Б. Башкуев и Д.Г. Буянова дают более конкретную трактовку по сути одинаковых рассматриваемых понятий. В одной из своих работ они пишут [7, с. 191–192]: «Под эффективным сопротивлением проводящей неоднородной среды (геоэлектрического разреза) на фиксированной частоте СДВ диапазона мы понимаем сопротивление некоторого фиктивного однородного изотропного полупространства, по значению равное его удельному электрическому сопротивлению (УЭС) на данной частоте».

Цель и академическая значимость научных исследований заключались в рассмотрении и объяснении геокриологической природы ранее неизвестных в прерывисто-островной мерзлоте Южной Якутии на территории г. Нерюнгри закономерностей изменчивости в слое годовых теплооборотов эффективных значений электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников. Для таких наук о Земле, как мерзловедение, инженерная геология и грунтоведение, а также для производства с решением задач инженерно-геологических изысканий, проектирования и строительства слой годовых теплооборотов важен и интересен следующей особенностью. В нем, как в приповерхностном слое криосферы Земли, наиболее интенсивно протекают до сих пор недостаточно основательно изученные процессы механического, теплового, химического и иного еще неизвестного типа взаимодействия горных пород в, частности, песчаников с фундаментами инженерных сооружений.

¹ В сравнении с эффективным сопротивлением это понятие, которое ввели в электроразведку на постоянном токе В.Р. Бурсиан, А.П. Краев и др., менее научно обосновано [6].

Участок исследований

Электросопротивление и диэлектрическая проницаемость песчаников изучались на территории г. Нерюнгри. Этот административный центр Южной Якутии расположен на расстоянии почти 800 км от г. Якутска — столицы Республики Саха (Якутия). Город находится на водоразделе рек Чульман, Малый Беркакит и Амнуннакта с абсолютными отметками высоты рельефа 832–871 м. В структурном отношении г. Нерюнгри находится в зоне складчатости по краевому шву Предстанового прогиба на южной окраине Алданского плоскогорья в пределах Алдано-Чульманской впадины. Инженерно-геологические условия строительства и эксплуатации инженерных сооружений в г. Нерюнгри типичны не только для отмеченной впадины, но и возможно для всей Южной Якутии, где в мезозойских тектонических депрессиях распространена мерзлая толща углевмещающих осадочных пород разной мощности и температуры [8, 9].

По данным Южно-Якутской комплексной геологоразведочной экспедиции, ООО «Нерюнгри-стройизыскания» и регионального обобщения МГУ им. М.В. Ломоносова [8, 9–12], доминирующим литотипом в толще мезозойских углевмещающих осадочных пород являются кварц-полевошпатовые песчаники. Минеральная матрица песчаников скреплена преимущественно крепким карбонатным цементом. В г. Нерюнгри песчаники представлены мелко-среднезернистыми разностями верхнеюрской кабактинской свиты, образуя южное крыло антиклинальной складки с углом падения от 35–40 до 15–20°. Слабые по прочности литогенные разности — алевролиты, аргиллиты, каменные угли встречаются в песчаниках в виде слоев и прослоев разной мощности.

Изначальное консолидированное прочностное состояние песчаников повсеместно нарушено тектоническими процессами [13, 14] и процессом физического выветривания (криогипергенеза) [15]. В последующем геологическом времени под воздействием климатических процессов в Южной Якутии, включая территорию г. Нерюнгри, сформировалась сложная по строению и неустойчивая во времени прерывисто-островная мерзлота. Ее строение, мощность и тепловой режим регулируются климатом, ландшафтом, геоморфологией местности [8], а также внутриземными тепловыми потоками, поступающими по тектоническим зонам дробления и повышенной трещиноватости к поверхности земли [16].

По общим оценкам, мощность островной мерзлоты на обширных водораздельных пространствах

Южной Якутии, включая Алдано-Чульманскую тектоническую депрессию (впадину), преимущественно равна 20–50 м. Здесь в примыкании к нижней части слоя годовых теплооборотов температура на глубине 10–15 м изменялась от –0,1 до –0,4 °С. В долинах рек и ручьев, а также на склонах северной экспозиции мощность островной мерзлоты увеличивается до 150–200 м, а температура пород на глубине 10–15 м понижается до –4 °С [9]. По данным термометрии изыскательских скважин, мощность островной мерзлоты в г. Нерюнгри не превышала 20 м, а температура песчаников на глубине 8–10 м изменялась от –0,1 до –0,8 °С. В областях распространения немерзлых песчаников и на площадках эксплуатируемых аварийных зданий, сооружений с утечками воды из инженерных коммуникаций песчаники находятся в талом состоянии. В этих местах температура техногенно-антропогенных песчаников, в разной степени насыщенных легко растворимыми солями и наполненных холодной или горячей водой, повышается на глубине 10–15 м до 1–5 °С.

Методика исследований

Применялась методика сплошного детального изучения методом ДИЗ изменчивости в слое годовых теплооборотов площадной изменчивости значений сопротивления и диэлектрической проницаемости верхней выветренной и нижней трещиноватой частей песчаников. Исследования выполнены ранней весной 2017–2023 гг. в центральной части города, включающей шесть жилых микрорайонов (кварталов). Точки ДИЗ удалось равномерно расположить в этой части г. Нерюнгри (рис. 1). Соблюдение принципа равномерности изначально создало условия для корректного изучения методом ДИЗ площадной изменчивости значений электрофизических характеристик песчаников на разной глубине в слое годовых теплооборотов.

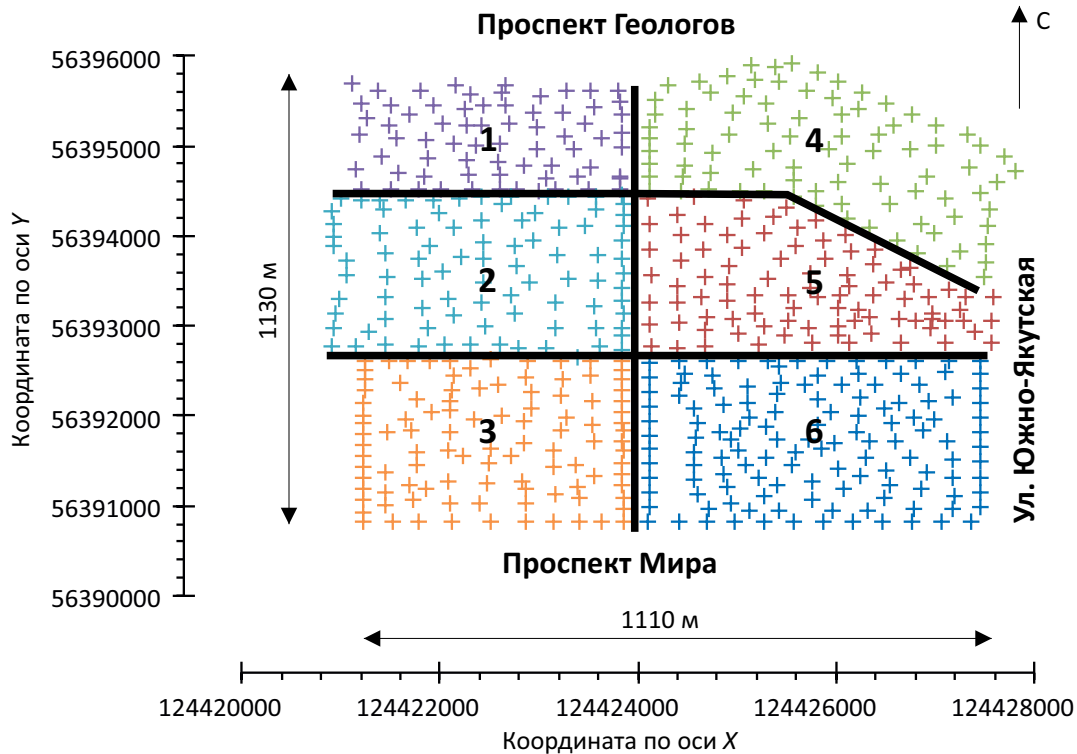
При производстве работ методом ДИЗ измерялось установившееся во времени гармоническое эллиптически поляризованное поле высокочастотного вертикального магнитного диполя (ВВМД). Измерение этого поля выполнялось в свободном пространстве между зданиями и сооружениями в каком-либо одном азимутальном направлении разнесения антенны ПРМ, принимающей суммарное первичное и вторичное поля ВВМД от неподвижно установленной в точке ДИЗ антенны ПРД, передающей (излучающей) первичное поле ВВМД. Измерения амплитудно-угловых составляющих вторичного поля ВВМД сделаны аппаратурой СЭМЗ [17] на частоте² 1,125 МГц в 575 точках ДИЗ. В ходе измерений расстояние между антеннами

² Из 4 предоставляемых аппаратурой СЭМЗ частот (2,2500; 1,1250; 0,56250; 0,28125 МГц) частота 1,1250 МГц оптимальна по показателям глубины индуктивного зондирования и чувствительности поля ВВМД к изменению состава, свойств и состояния песчаников.

Рис. 1. Местоположение точек дистанционного индуктивного зондирования
 Кварталы: 1 — В, 2 — Г–Е, 3 — М, 4 — А, 5 — Б, 6 — К. Вертикальная линия — проспект Ленина. Верхняя горизонтально-наклонная и нижняя горизонтальная линии — проспекты Карла Маркса и Дружбы Народов

Fig. 1. Location of remote inductive sensing points

Quarters: 1 — В, 2 — Г–Е, 3 — М, 4 — А, 5 — Б, 6 — К. Vertical line — Lenina Avenue. Verkhnyaya gorizontalnaya and nizhnaya gorizontalnaya — slope lines-prospectus for Carla Marca and Drujyb



(в дальнейшем разнос) изменялось с интервалом 5 м от минимально допустимого начального значения 5 м до оптимального в переходной волновой зоне максимального значения 50 м.

Вычисление значений электросопротивления выполнялось по формуле, которая связывала величину отношения модуля амплитуды напряженности вертикальной (H_z) и горизонтальной (H_x) составляющих поля ВВМД с частотой этого поля, разном антенных устройств и параметром N . Таблица-номограмма, по которой определялся параметр N , приведена вместе с формулой вычисления значений электросопротивления в работе В.И.Иголкина с соавторами [18]. В этой же работе приведен наглядный пример совместного определения графических оценок электросопротивления и диэлектрической проницаемости по одной из палеток, скопированных из альбома палеток В.Ф.Лебедева [19].

Исходными данными для палеток служили значения модуля амплитуд напряженности большой и малой осей эллипса поляризации, а также угол наклона большой оси к поверхности земли.

Так как в альбоме палеток В.Ф. Лебедева не было палетки для частоты 1,125 м и разноса 50 м, то пришлось значение этого разноса уменьшить до 40 м. После этого по альбому палеток В.Ф. Лебедева были определены единичные значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников в 575 точках ДИЗ для значений разноса 5 и 40 м. По этой большой выборочной совокупности фактического материала были вычислены фоновые³ значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников (таблица). Для первого разноса фоновые значения равны 856 Ом·м и 6,4 отн. ед., а для второго разноса — 1538 Ом·м и 4,8 отн. ед. По этим оценкам для заданных частоты 1,125 МГц и разноса 5 и 40 м по методике В.С.Титлинова и Р.Б.Журавлевой [20] была вычислена эффективная глубина (далее — глубина) проникновения поля ВВМД в песчаники или, что то же самое, глубину индуктивного зондирования методом ДИЗ.

Результаты вычислений следующие.

На разносе 5 м изучается верхняя выветренная часть песчаников на глубине 0–5 м, а на раз-

³ По показателю медианного среднего.

носе 40 м – нижняя трещиноватая часть песчаников на глубине 5–14 м. Заметим, что по ранее полученным на частоте 1,125 МГц в интервале разноса 5–50 м обобщенным оценкам электрофизических характеристик песчаников (2800 Ом·м и 3,9 отн. ед.) глубина изучения песчаников методом ДИЗ в г. Нерюнгри составляла 6–18 м [21].

Общая глубина изучения песчаников методом ДИЗ равна 0–14 м. По данным бурения скважин песчаники преимущественно изучены до глубины 10–15 м. Причем по обобщенным данным инженерно-геологических изысканий граница между выветренной и трещиноватой частями песчаников находится в среднем на глубине 4–6 м. До этой глубины, сложенной преимущественно элювиально-делювиальными образованиями⁴, температурно-влажностное и напряженно-механическое состояние консолидированных останцов песчаников, сохранившихся от разрушения процессами физического выветривания и криогенного метаморфизма, разнонаправлено изменяется в сезонных циклах промерзания-оттаивания.

Закономерности и локально-аномальные особенности изменчивости в слое годовых теплооборотов значений электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников на территории г. Нерюнгри изучены стандартными

методами вероятно-статистического анализа с помощью программы «Стадия» [22] и частично с применением общедоступных начальных версий зарубежных программ Statistica и Origin.

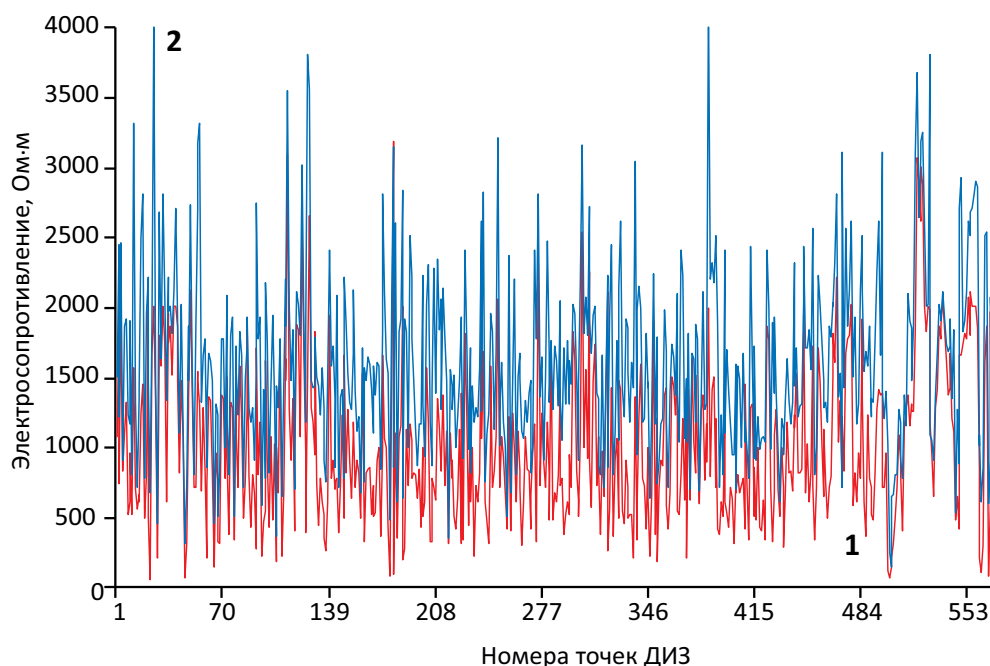
Вариационный анализ

Из сопоставления вариационных рядов (рис. 2, рис. 3) следует, что при увеличении глубины изучения песчаников с переходом из выветренной части в трещиноватую значения электросопротивления систематически увеличиваются, а диэлектрической проницаемости – уменьшаются. В этом состоит первая структурно-петрофизическая и электродинамическая закономерность. Вторая такого же типа закономерность заключается в большей изменчивости электросопротивления и диэлектрической проницаемости выветренных песчаников по отношению к трещиноватым песчаникам. Эта закономерность проявляется в разной степени изрезанности графиков вариационных рядов.

В математической статистике интегральную степень изменчивости принято количественно оценивать по значениям коэффициента вариации. Эти значения (см. таблицу) свидетельствуют о том, что электросопротивление существенно более вариативно в отличие от вариативности диэлектрической проницаемости. Причем это отличие по

Рис. 2. Вариационные ряды значений электросопротивления песчаников на частоте 1,125 МГц
Глубина, м: 1 – 0–5; 2 – 5–14

*Fig. 2. Variation series of sandstone electrical resistance values at a frequency of 1.125 MHz
Depth, m: 1 – 0–5; 2 – 5–14.*



⁴ В этом слое со средней мощностью 2–3 м содержится большое количество глинистого материала (супеси, суглинков), заполняющего промежутки между крупнообломочным материалом (глыбами, гравием, щебнем).

Рис. 3. Вариационные ряды значений диэлектрической проницаемости песчаников на частоте 1,125 МГц
Глубина, м: 1 — 0–5; 2 — 5–14

Fig. 3. Variation series of values of the dielectric constant of sandstones at a frequency of 1.125 MHz
Depth, m: 1 — 0–5; 2 — 5–14

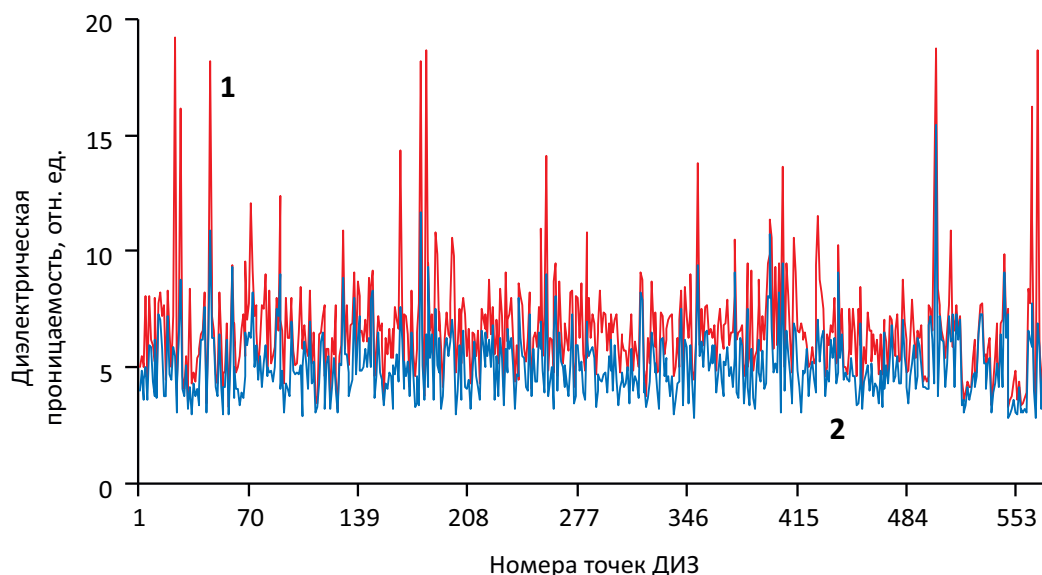


Таблица. Значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников
Table. Values of electrical resistance and dielectric permittivity of sandstones

Статистика	Электросопротивление, Ом·м		Диэлектрическая проницаемость, отн. ед.	
	1	2	1	2
Среднее арифметическое значение	1017	1618	6,7	5,1
Медианное среднее значение (фон)	856	1538	6,4	4,8
Модальное среднее значение	712	1487	6,3	4,2
Стандартное отклонение (70,0 %)	578,1	667,8	2,25	1,51
Коэффициент вариации, %	56,8	41,3	33,6	29,6
Доверительный интервал (70,0 %)	439–1595	950–2286	4,45–8,95	3,59–6,61
Минимальное значение	55	154	3,2	2,8
Максимальное значение	3189	4200	19,2	15,4
Число определений	575	575	575	575
Уровень надежности (95,0 %)	46,0	53,1	0,2	0,1

Примечание. Глубина: 1 — 0–5 м; 2 — 5–14 м.

электросопротивлению в выветренных и трещиноватых песчаниках составляет 31,6 %, тогда как у диэлектрической проницаемости оно равно 12,6 %. Относительная разница в этих цифрах более чем в два раза указывает на высокую чувствительность электросопротивления к общему изменению по площади и по глубине строения, состава, свойств и состояния песчаников. Диэлектрическая проницаемость такой чувствительностью не обладает. Она слабо реагирует на изменение структуры и петрографии песчаников. С этой точки зрения диэлек-

трическая проницаемость малоинформативна по сравнению с электросопротивлением. Если рассматривать их общее информационное пространство в подмножестве значений коэффициента вариации, то приходим к следующему выводу.

Высокая степень снижения по глубине вариативности электросопротивления указывает на более уплотненную нижнюю трещиноватую часть песчаников на глубине 5–14 м. При этом незначительная степень снижения вариативности диэлектрической проницаемости однозначно свидетель-

ствует о том, что эта часть песчаников не может считаться полностью консолидированной в структурно-прочностном отношении, так как все еще содержит в трещинно-жильной структуре глинистый материал — тонкодисперсные продукты физического выветривания в виде супесей, суглинков и реже глин.

Соотношение степени изменчивости электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников на глубине 0–5 и 5–14 м по значениям коэффициента вариации сохраняется и в средних показателях этих электрофизических характеристик. По показателю медианного среднего электросопротивления трещиноватых песчаников на глубине 5–14 м увеличивается в 1,6–1,8 раз, а диэлектрическая проницаемость снижается в 1,3–1,5 раза. Применительно к слою годовых теплооборотов эти цифры, полученные по данным геофизики методом ДИЗ, допускают принять тождественное геологическое решение. А именно, на глубине более 5 м степень уплотнения и структурно-прочностной консолидации нижней трещиноватой части песчаников по отношению к верхней выветренной части песчаников возрастает в 1,3–1,8 раз. Напомним, что по обобщенным данным ООО «Нерюнгростройизыскания» граница между выветренными и трещиноватыми песчаниками расположена на глубине 4–6 м. Однако по данным изысканий точной количественной оценки степени уплотнения и упрочнения песчаников на этой глубине нет. Известно только, что на глубине 6–7 м средние значения объемного веса песчаников в целом возрастают от 2,57 до 2,59–2,60 г/см³ [23].

Несбалансированная и взаимно противоположная изменчивость по глубине электросопротивления и диэлектрической проницаемости вместе с количественной оценкой роста уплотнения и структурно-прочностной консолидации песчаников г. Нерюнгри косвенно подтверждает известные общие петрографические и петрофизические закономерности [12, 24, 25], повсеместно наблюдаемые в коре выветривания коренных пород. Применительно к территории г. Нерюнгри эти закономерности означают, что такие структурные параметры, как число, извилистость, длина и ширина открытости трещин, с увеличением глубины изучения песчаников в зоне физического выветривания и в слое годовых теплооборотов уменьшаются, а трещины в нижней части песчаников преимущественно заполнены воздухом и/или льдом, а не глинистым материалом и растительными остатками вместе с атмосферной и подземной водой.

В целом закономерный процесс уплотнения и структурно-прочностной консолидации, песчаников по глубине в зоне физического выветривания и слое годовых теплооборотов проявляется в одинаковой воспроизводимости системы разнонаправленных локальных вариаций электросопротив-

ления и диэлектрической проницаемости на графиках вариационных рядов (см. рис. 2, 3).

Степень близости вариационных рядов, оцененная по значению коэффициента параметрической корреляции в предположении линейной связи между значениями электросопротивления и диэлектрической проницаемости на глубине 0–5 и 5–14 м, составляет 78,7 и 75,7 % соответственно. В варианте нелинейной связи степень близости вариационных рядов оценивается неоднозначно по значениям коэффициентов непараметрической корреляции с использованием критериев Спирмена и Кендалла и изменяется от 57,9 до 77,6 %.

Описательная статистика (см. таблицу) удостоверяет очень широкую изменчивость единичных значений электросопротивления. На глубине 0–5 м они изменяются от 55 до 3189 Ом·м, а на глубине 5–14 м — от 154 до 4200 Ом·м. При этом средние значения (арифметическое, медианное, модальное) составляют 712–1017 и 1478–1618 Ом·м соответственно.

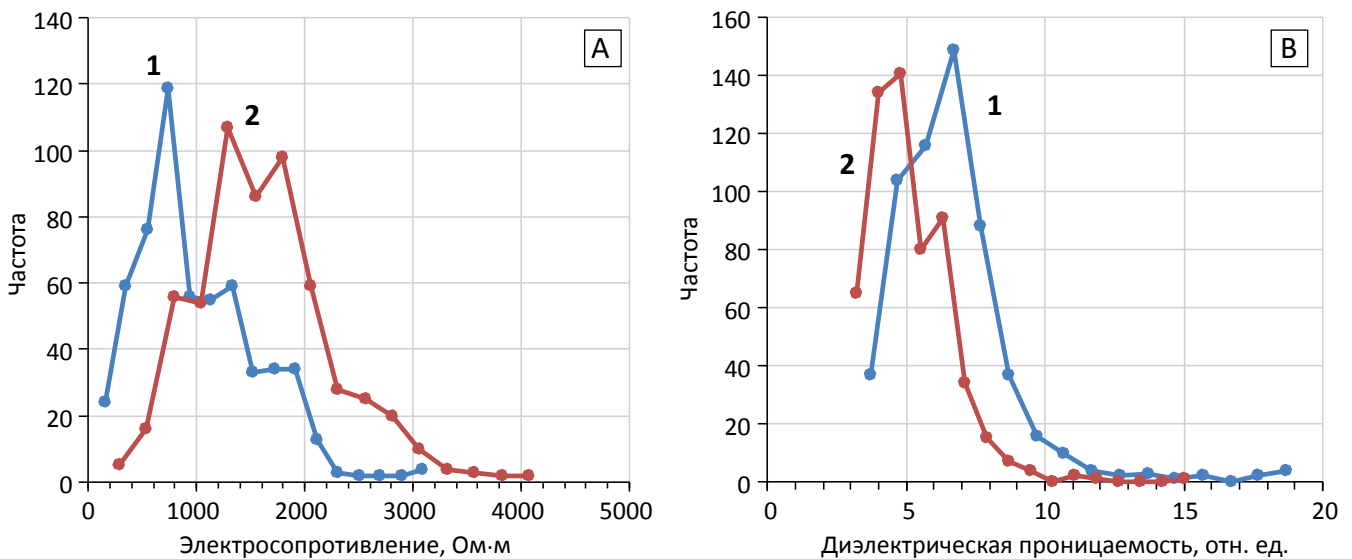
Единичные значения диэлектрической проницаемости на отмеченных глубинах изменяются менее широко — от 3,2 до 19,2 и от 2,8 до 15,4 отн. ед. при средних значениях 6,3–6,7 и 4,2–5,1 отн. ед. В 70,0 % случаев значения электросопротивления выветренных песчаников распределены в доверительном интервале 439–1595 Ом·м, а трещиноватых песчаников — в интервале 950–2286 Ом·м. С такой же вероятностью значения диэлектрической проницаемости выветренных и трещиноватых песчаников распределены в доверительном интервале 4,45–8,95 и 3,59–6,61 отн. ед. соответственно.

Рассмотрим процесс плотностной и прочностной консолидации песчаников по глубине. Этот процесс в локально-блочной реализации в зоне физического выветривания и слое годовых теплооборотов непредсказуем, но его вероятностная структура в пространственной изменчивости значений электросопротивления и диэлектрической проницаемости в общих чертах упорядочена и представлена двумя частями (рис. 4).

Первая часть вероятностной структуры состоит из сгруппированных в окрестности максимумов графиков полигонов среднеинтервальных значений. Вторая часть это — асимптотически распределенные в правой части графиков полигонов аномальные значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости, наблюдаемые за пределами максимумов. В верхней выверенной части песчаников, разрушенных до состояния «рухляка» или «разборной скалы», аномальные значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости на глубине 0–5 м редко превышают 1500 Ом·м и 10 отн. ед. В нижней трещиноватой части песчаников аномальные значения электросопротивления и диэлектрической проницаемо-

Рис. 4. Графики полигонов значений электросопротивления (А) и диэлектрической проницаемости (В) песчаников
Глубина, м: 1 — 0–5; 2 — 5–14. Объем выборки — 575 точек ДИЗ

*Fig. 4. Graphs of polygons of electrical resistance (A) and dielectric constant (B) of sandstones
Depth, m: 1 — 0–5; 2 — 5–14. The sample size is 575 data points*



сти на глубине 5–14 м также представляют редкие случайные события со значениями 2300 Ом-м и 8 отн. ед.

Тестовая проверка, сделанная по трем независимым критериям Колмогорова, Омега-квадрат и Хи-квадрат [22], показывает, что изменчивость значений электросопротивления и диэлектрической проницаемости песчаников не может быть описана фундаментальным законом больших чисел. Эта изменчивость корректно описывается законом Вейбулла или логнормальным законом. Однако закон Вейбулла с большей точностью аппроксимации описывает изменчивость значений электрофизических характеристик песчаников. Более того, этим же законом корректно описывается изменчивость лабораторных значений R_c — временного предела прочности воздушно-сухих и искусственно замоченных водой образцов песчаников на одноосное сжатие, а также прогнозных значений R_c массива песчаников в водонасыщенном состоянии по данному методу ДИЗ, полученным на территории г. Нерюнгри [26].

Близость описания одним и тем же законом Вейбулла закономерных изменений значений электрофизических и прочностных свойств песчаников, конечно же, неслучайна и обусловлена теми причинно-следственными отношениями, которые возникают на макроструктурном иерархическом уровне⁵ и проявляются в пространстве корреляционных связей между прочностью, электросопротивлением и диэлектрической проницаемостью

песчаников. В этой зависимости прочность служит не только локально-местной для инженерно-геологических условий территории г. Нерюнгри, но и региональной для всей Южной Якутии интегральной характеристикой. То есть той характеристикой, которая объединяет в себе итог совокупного влияния на затухание поля ВВМД в толще осадочных пород Южной Якутии всех взаимосвязанных и разнонаправленных мерзлотно-грунтовых факторов⁶ [21, 27].

Несмотря на нарушение закона больших чисел, контрастность разделения мод — максимумов графиков полигонов (см. рис. 4) позволяет в большинстве случаев надежно решать методом ДИЗ задачу идентификации границы между выветренной и трещиноватой частями песчаников, опираясь на знание изменчивости значения электросопротивления и диэлектрической проницаемости. Следует заметить, что положение этой опорной структурной границы важно знать проектировщикам, геологам-изыскателям, а также строителям, которые в г. Нерюнгри или иных местах Южной Якутии закладывают ленточный или столбчато-свайный фундамент инженерных сооружений на поверхность трещиноватых песчаников или иных осадочных пород в вырытом котловане с убранной выветренной частью пород.

⁵ В масштабе массива песчаников.

⁶ Петрографических, структурных, криогенных и петрофизических.

Заключение

Полученные по данным метода ДИЗ результаты изучения пространственной изменчивости на территории г. Нерюнгри значений электрофизических характеристик толщи углевмещающих осадочных пород, представленных преимущественно песчаниками, дают основание сделать следующее заключение. При широкой случайной изменчивости в слое годовых теплооборотов единичных значений электросопротивления (от 55–154 до 3189–4200 Ом·м) и диэлектрической проницаемости (от 2,8–3,2 до 15,4–19,2 отн. ед.) фоновые значения этих электрофизических характеристик изменяются закономерно. Фоновое значение электросопротивления выветренных песчаников равно 856 Ом·м на глубине 0–5 м увеличивается у трещиноватых песчаников до 1538 Ом·м на глубине 5–14 м. У диэлектрической проницаемости наблюдается снижение фоновых значений от 6,4 до 4,8 отн. ед. при переходе из выветренных в трещиноватые песчаники. Такая обратная закономерность изменчивости по глубине фоновых значений электрофизических характеристик песчаников объясняется естественным процессом уплотнения и упрочнения песчаников в зоне физического выветривания. Рост электросопротивления в 1,8 раз и снижение диэлектрической проницаемости в 1,3 раза рассматриваются как количественные оценки степени структурной консолидации трещиноватых песчаников на глубине 5–14 м. Научная

значимость результатов исследований электрофизических характеристик песчаников состоит в том, что они расширяют границы знаний в области геоинформатики, петрофизики и геомеханики осадочных пород, а также уточняют теоретические представления в области электродинамики геологической среды. В производственном отношении результаты исследований предлагается использовать в ходе дальнейшего промышленного освоения территории Южной Якутии с применением метода ДИЗ в составе инженерно-геологических изысканий с опережением во времени производства буровых и лабораторных работ.

Автор статьи приносит глубокую благодарность и признательность главному инженеру ООО «Нерюнгростройизыскания» А.В. Осьмушкину за предоставленную возможность систематически работать с материалом инженерно-геологических изысканий г. Нерюнгри.

Исследования выполнены в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН по госбюджетному финансированию (этап 2025 г.) в соответствии с программой СО РАН «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов». Регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9.

Список источников

1. *Технология* исследования нефтегазовых скважин на основе ВИКИЗ. Методическое руководство / Ред. М.И. Эпов, Ю.Н. Антонов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 122 с.
2. *Иноземцев М.А.* Обзор методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород // *Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции (18–20 ноября 2020 г.): в 2 ч. – Часть 1.* – Томск: В-Спектр, 2020. – С. 279–281.
3. *Касимова А.У., Верзунов С.Н.* Обзор и анализ современных методов измерения диэлектрической проницаемости горных пород // *Проблемы автоматизации и управления.* – 2022. – № 1 (43). – С. 33–49.
4. *Денисов Р.Р., Капустин В.В.* Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // *Геофизика.* – 2010. – № 4. – С. 76–80.
5. *Куляндин Г.А., Федорова Л.Л., Омеляненко А.В., Оленченко В.В.* Определение электрофизических свойств пород горного массива методом георадиолокационного каротажа // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2011. – № 8. – С. 300–304.
6. *Дахнов В.Н.* Интерпретация результатов геофизических исследований геофизических исследований разрезов скважин / 2-е изд., перераб. – М.: Недра, 1982. – 448 с.
7. *Башкуев Ю.Б., Буянова Д.Г.* Электрические свойства горных пород Алдано-Станового нагорья по данным сверхдлинноволнового радиомпедансного зондирования с борта самолета // *Горный информационно-аналитический бюллетень.* – 2011. – № 1. – С. 190–196.
8. *Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района* / Под ред. В.А. Кудрявцева. – М.: МГУ, 1975. – 444 с.
9. *Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н.* Геокриологические условия Токарикского и Гувилгринского грабен (Южная Якутия) // *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* – 2023. – Т. 28. – № 2. – С. 261–274. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274.
10. *Желинский В.М., Коробицына В.Н., Каримова С.С.* Мезозойские отложения и генетические типы угольных пластов Южной Якутии. – Новосибирск: Наука, 1976. – 126 с.
11. *Желинский В.М.* Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1980. – 119 с.
12. *Гриб Н.Н., Самохин А.В.* Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. – Новосибирск: Наука, 1999. – 240 с.

13. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. – Вып. 15. – М.: МГУ, 1976. – С. 120–125.
14. Мокшанцев К.Б., Горнштейн Д.К., Гусев Г.С. и др. Тектоническое строение Якутской АССР. – М.: Наука, 1964. – 291 с.
15. Шестернев Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. – Новосибирск: СО РАН, 2001. – 266 с.
16. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.
17. Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования (СЭМЗ). Техническое описание. – Красноярск: Сибцветметавтоматика СССР, 1991. – 30 с.
18. Иголкин В.И., Шайдуров Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. – Красноярск: СФУ, 2016. – 272 с.
19. Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. – Красноярск: Сибцветметавтоматика СССР, 1991. – 83 с.
20. Титлинов В.С., Журавлева Р.Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. – Екатеринбург: Наука, 1995. – 56 с.
21. 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. DOI: 10.15372/KZ20220605.
22. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. – М.: Форум. ИНФРА-М, 2006. – 512 с.
23. Нерадовский Л.Г. Динамика физико-механических свойств песчаника в слое годовых теплооборотов Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // Геоинформатика. – 2024. – № 2. – С. 36–44. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-2-36-44.
24. Ярг Л.А. Методы инженерно-геологических исследований процесса и кор выветривания. – М.: Недра, 1991. – 139 с.
25. Мамяшев В.Г., Кузнецова А.М. Закономерности уплотнения песчано-глинистых пород осадочного чехла Западно-Сибирского нефтегазосного мегабассейна // Геофизика. – 2023. – № 4. – С. 34–40. DOI: 10.34926/geo.2023.83.38.006.
26. Нерадовский Л.Г. Геолого-геофизические оценки прочности песчаников Южной Якутии в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри // Геофизика. – 2024. – № 4. – С. 70–77. DOI 10.34926/geo.2024.32.50.010.
27. Нерадовский Л.Г. Результаты верификации точности модели прогноза прочности осадочных пород Южной Якутии методом дистанционного индуктивного зондирования // Криосфера Земли. – 2024. – Т. 28. – № 4. – С. 16–26. DOI: 10.15372/KZ20240402.

References

1. Егров М.И., Antonov Yu.N. (eds.) Tekhnologiya issledovaniya neftegazovykh skvazhin na osnove VIKIZ. Metodicheskoe rukovodstvo. [Technology of exploration of oil and gas wells based on WIKIS. Methodological guidance.]. Novosibirsk: Izdatel'stvo SO RAN; 2000. 122 p.
2. Inozemtsev M.A. Obzor metodov izmereniya dielektricheskoi pronitsaemosti gornyykh porod [Review of methods for measuring the permittivity of rocks]. In: Ehlektronnye sredstva i sistemy upravleniya: materialy dokladov XVI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (November 18-20, 2020): in 2 pts. Part 2. Tomsk: V-Spektr; 2020. pp. 279–281.
3. Kasimova A.U., Verzunov S.N. Review and analysis of modern methods for measuring the dielectric permeability of rocks. *Problemy avtomatiki i upravleniya*. 2022;(1):33–49.
4. Denisov R.R., Kapustin V.V. Computerized georadar data processing. *Journal of geophysics*. 2010;(4):76–80.
5. Kulyandin G.A., Fedorova L.L., Omel'yanenko A.V., Olenchenko V.V. Opredelenie ehlektrofizicheskikh svoystv porod gornogo massiva metodom georadiolokatsionnogo karotazha [Determination of the electrophysical properties of rocks of a mountain range by the method of georadiolocation logging]. *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)*. 2011;(8):300–304.
6. Dakhnov V.N. Interpretatsiya rezul'tatov geofizicheskikh issledovaniy geofizicheskikh issledovaniy razrezov skvazhin [Interpretation of the results of geophysical studies of geophysical studies of well sections]. 2nd edn., revised. Moscow: Nedra; 1982. 448 p.
7. Bashkuev Yu.B., Buyanova D.G. Electrical properties of rocks of the Aldan-Stanovy upland according to the data of ultra-long-wave radio impedance sounding from an airplane. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)*. 2011; (1): 190–196.
8. Kudryavtsev V.A. (ed.) Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenerno-geologicheskie usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo raiona [Southern Yakutia: permafrost-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region]. Moscow: MGU; 1975. 444 p.
9. Sysolyatin R.G., Zheleznyak M.N. Geocryological conditions of the Tokarikan and Guvilgrinsky grabens (South Yakutia). *Arctic and subarctic natural resources*. 2023;28(2):261–274. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274.
10. Zhelinskii V.M., Korobitsyna V.N., Karimova S.S. Mezozoiskie otlozheniya i geneticheskie tipy ugol'nykh plastov Yuzhnoi Yakutii [Mesozoic deposits and genetic types of coal seams in Southern Yakutia]. Novosibirsk: Nauka; 1976. 126 p.
11. Zhelinskii V.M. Mezozoiskaya uglenosnaya formatsiya Yuzhnoi Yakutii [Mesozoic coal-bearing formation of South Yakutia]. Novosibirsk: Nauka; 1980. 119 p.
12. Grib N.N., Samokhin A.V. Fiziko-mekhanicheskie svoystva uglevmeshchayushchikh porod Yuzhno-Yakutskogo basseina [Physical and mechanical properties of carbon-bearing rocks of the South Yakut basin]. Novosibirsk: Nauka; 1999. 240 p.
13. Buldovich S.N., Melent'ev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. Rol' noveishikh razryvnykh narushenii v formirovaniy merzlotno-gidrogeologicheskikh uslovii (na primere Neryungrinskoi sinklinali Yuzhno-Yakutskogo mezozoiskogo progiba) [The role of recent faults in the formation of permafrost and hydrogeological conditions (case study of the Neryungri syncline, South-Yakutian Mesozoic trough)]. In: Merzlotnye Issledovaniya. Iss 15. Moscow: MGU; 1976. pp. 120–125.

14. Mokshantsev K.B., Gornshstein D.K., Gusev G.S. et al. Tektonicheskoe stroenie Yakutskoi ASSR [The tectonic structure of the Yakut ASSR]. Moscow: Nauka; 1964. 291 p.
15. Shesternev D.M. Kriogipergenez i geotekhnicheskie svoystva porod kriolitozony [Cryohypergenesis and geotechnical properties of cryolithozone rocks]. Novosibirsk: SO RAN; 2001. 266 p.
16. Zheleznyak M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona yugo-vostoka Sibirskoi platformy [Geotemperature field and permafrost in the southeastern Siberian Platform]. Novosibirsk: Nauka; 2015. 227 p.
17. Kompleks srednechastotnoi apparatury ehlektromagnitnogo zondirovaniya (SEhMZ). Tekhnicheskoe opisanie [The system for medium-frequency electromagnetic sounding (SEMZ). Technical specification]. Krasnoyarsk: Sibsvetmetavtomatika SSSR; 1991. 30 p.
18. Igolkin V.I., Shaidurov G.YA., Tronin O.A., Khokhlov M.F. Metody i apparatura ehlektorazvedki na peremennom toke [Methods and equipment of electrical exploration on alternating current]. Krasnoyarsk: SFU; 2016. 272 p.
19. Lebedev V.F., Onushchenko V.I., Litvintseva L.M. Kompleks SEhMZ. Metodicheskoe posobie [SEMZ system. A methodological guideline]. Krasnoyarsk: Sibsvetmetavtomatika SSSR; 1991. 83 p.
20. Titlinov V.S., Zhuravleva R.B. Tekhnologiya distantsionnykh induktivnykh zondirovaniy [Technology for distance inductive soundings]. Yekaterinburg: Nauka; 1995. 56 p.
21. 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*. 2022;26(6):37–49. DOI: 10.15372/KZ20220605.
22. Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and tools for integrated data analysis]. Moscow: Forum: INFRA-M; 2006. 512 p.
23. Neradovskii L.G. Dynamics of the physical properties of sandstone within the depth of annual ground temperature variation, Southern Yakutia (Neryungri case study). *Geoinformatika*. 2024;(2):36–44. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-2-36-44.
24. Yarg L.A. Metody inzhenerno-geologicheskikh issledovaniy protsessa i kor vyvetrivaniya [Methods of engineering and geological studies of the process and crust of weathering]. Moscow: Nedra; 1991. 139 p.
25. Mamyashev V.G., Kuznetsova A.M. Laws of compaction of sandy-clay rocks in the sedimentary cover of the West Siberian oil and gas-bearing mega-basin. *Journal of geophysics*. 2023;(4):34–40. DOI: 10.34926/geo.2023.83.38.006.
26. Neradovskii L.G. Geological and geophysical assessments of the strength of sandstones of South Yakutia at the foundation of engineering structures of the city of Neryungri. *Journal of geophysics*. 2024;(4):70–77. DOI 10.34926/geo.2024.32.50.010.
27. Neradovskii L.G. Verification of the accuracy of the model for predicting strength of sedimentary rocks of Southern Yakutia based on geometric electromagnetic induction sounding. *Kriosfera Zemli*. 2024;28(4):16–26. DOI: 10.15372/KZ20240402.

Статья поступила в редакцию 16.12.2024 г., одобрена после рецензирования 17.02.2025 г., принята к публикации 22.05.2025 г.
The article was submitted 16.12.2024; approved after reviewing 17.02.2025; accepted for publication 22.05.2025.

Информация об авторе

Нерадовский Леонид Георгиевич

Доктор технических наук

Заслуженный деятель науки Республики Саха (Якутия)

Старший научный сотрудник лаборатории инженерной геокриологии

ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН» (ИМЗ СО РАН)

677010 Республика Саха (Якутия), Якутск, ул. Мерзлотная, 36

e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

Information about author

Leonid G. Neradovskii

Doctor of Technical Sciences

Senior Researcher at the Laboratory of Engineering Geocryology

Melnikov Permafrost Institute SB RAS

36, Merzlotnaya St., Yakutsk, 677010, Russia

e-mail: leoner@mpi.ysn.ru