

Геоинформатика. 2023. № 4. С. 39–51.  
*Geoinformatika*. 2023;(4):39–51.

### Моделирование геообъектов и геопроцессов

Научная статья  
 УДК 550.370+552.08  
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-39-51>

## Технология изучения методом дистанционного индуктивного зондирования электрофизических характеристик осадочных пород Южной Якутии на железнодорожной станции Кюргеллях

© 2023 г. — Леонид Георгиевич Нерадовский

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН; г. Якутск, Россия  
[leoner@mpi.ysn.ru](mailto:leoner@mpi.ysn.ru)

**Аннотация:** Изучены возможности новой технологии применения метода дистанционного индуктивного зондирования на частоте 1,125 и 0,281 МГц в интервале разноса излучающей и приёмной антенн в части количественной оценки электрофизических характеристик в скальном основании инженерных сооружений на железнодорожной станции Кюргеллях в Южной Якутии. В толще льдистых и глинистых делювиально-элювиальных образований и осадочных пород (доломитов, известняков) установлен нетипичный в геоэлектрике на переменном токе общий рост по глубине эффективных значений электрического сопротивления и вещественной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости. Диапазон изменчивости сопротивления и проницаемости составляет 600–1600 Ом·м и 3–7 отн. ед. По резкой смене (с меньшего на больший) темпа роста сопротивления и проницаемости обнаружены две границы. Первая структурная граница залегает на глубине около 10 м и соответствует нижней границе области интенсивного выветривания. Вторая петрофизическая граница залегает на глубине около 20 м и характеризует переход сильноветренной и сильнотрещиноватой верхней части массива осадочных пород в нижнюю консолидированную прочную часть, расположенную в области термического покоя. Полученные результаты дают основание рекомендовать апробированную технологию для решения задач геомеханики и теплофизики мёрзлых грунтов в части определения их прочности и глубины залегания нижней границы слоя годовых теплооборотов.

**Ключевые слова:** станция Кюргеллях, делювиально-элювиальные образования, массив осадочных пород, метод дистанционного индуктивного зондирования, частота 1,125 и 0,281 МГц, диэлектрическая проницаемость, электросопротивление, эффективная глубина

**Для цитирования:** Нерадовский Л.Г. Технология изучения методом дистанционного индуктивного зондирования электрофизических характеристик осадочных пород Южной Якутии на железнодорожной станции Кюргеллях // Геоинформатика. — 2023. — № 4. — С. 39–51. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-39-51>.

### Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

## Technology for studying the electrophysical characteristics of sedimentary rocks of South Yakutia at the railway station Kyurgellyakh using the method of remote inductive probing

© 2023 — Leonid G. Neradovskii

Melnikov Permafrost Institute SB RAS; Yakutsk, Russia  
[leoner@mpi.ysn.ru](mailto:leoner@mpi.ysn.ru)

**Abstract:** The possibilities of a new technology for applying the method of remote inductive sensing at a frequency of 1,125 and 0,281 MHz in the separation interval of the emitting and receiving antennas in terms of quantitative assessment of electrophysical characteristics in the rock foundation of engineering structures at the railway station Kyurgellyakh in South Yakutia are studied. In the strata of icy and clay deluvial-eluvial formations and sedimentary rocks (dolomites, limestones), a general increase in depth of the effective values of the electrical resistance and the real part of the complex relative permittivity, which is atypical in AC geoelectrics, has been established. The range of variability of resistivity and permeability is 600–1600 Ohm·m and 3–7 arb. units. According to a sharp change (from a smaller to a larger one) in the growth rate of resistance and permeability, two boundaries were found. The first structural boundary lies at a depth of about 10 m and corresponds to the lower boundary of the area of intense weathering. The second petrophysical boundary lies at a depth of about 20 m and characterizes the transition of the highly weathered and highly fractured upper part of the sedimentary rock mass into the lower consolidated solid part located in the area of thermal rest. The obtained results give grounds to recommend a proven technology for solving the problems of geomechanics and thermophysics of frozen soils in terms of determining their strength and depth of the lower boundary of the layer of annual heat exchanges.

**Key words:** station Kyurgellyakh, deduvial-eluvial formations, sedimentary rock mass, remote inductive sounding method, frequency 1,125 and 0,281 MHz, dielectric constant, electrical resistivity, effective depth

**For citation:** Neradovskii L.G. Technology for studying the electrophysical characteristics of sedimentary rocks of South Yakutia at the railway station Kyurgellyakh using the method of remote inductive probing. *Geoinformatika*. 2023;(4):39–51. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2023-4-39-51>. In Russ.

## Введение

В предыдущей статье [24] на участке Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (АЯМ) были изучены инженерно-геологические возможности метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ). Данные этого метода были использованы для верификации вероятностной модели г. Нерюнгри, которая была применена для решения одной из важнейших<sup>1</sup> задач геомеханики. Речь идёт о прогнозе в водонасыщенном состоянии прочности массива осадочных пород, слагающих несжимаемые скально-полускальные основания инженерных сооружений, расположенных по трассе и на площадках станционных посёлков АЯМ.

В настоящей статье продолжается изучение возможностей метода ДИЗ в аспекте его применения для решения задач инженерной-строительных изысканий, которые охватывают все объекты промышленности (энергетики, транспорта и пр.), проектируемых и эксплуатируемых в освоенных и осваиваемых регионах России со смещением на территорию Субарктики и Арктики. В отличие от прошлой статьи [24] в настоящей статье на примере ещё одного участка АЯМ — станции Кюргеллях — изучены возможности метода ДИЗ в определении и вероятностно-статистическом анализе с помощью программы «Стадия» эффективных значений двух базовых в геоэлектрике электрофизических характеристик. Решение этой петрофизической задачи получено в зависимости от глубины проникновения в мёрзлый массив осадочных пород высокочастотного гармонического поля вертикального магнитного диполя (ВВМД).

Ретроспективный анализ фактического материала метода ДИЗ, полученного в 1990–1991 гг., выполнен за счёт госбюджетного финансирования в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в рамках этапа НИР 2023 г. по программе СО РАН «Устойчивость природно-технологических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов». Регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9.

## Станция Кюргеллях

Небольшая и ныне действующая станция Кюргеллях расположена к северо-востоку от административного центра Южной Якутии г. Нерюнгри в сторону столицы Республики Саха (Якутия) — г. Якутска. Расстояние от станции Нерюнгри-Пассажирская до станции Кюргеллях по трассе АЯМ составляет 572 км. Недалеко от станции (около 12 км на юго-запад) расположен посёлок дорожников

Улу. В геоморфологическом отношении станция Кюргеллях находится на возвышенном Лено-Алданском плато. Местом строительства станции проектировщики выбрали вершину и привершинную часть пологих склонов водораздела двух ручьёв: Орто-Тала и Аччыгый-Тала. Абсолютные отметки поверхности водораздела в пределах расположения станции изменялись от 513 до 529 м. Изыскания на станции Кюргеллях были выполнены в 1990–1991 гг. на стадии «Проект» Якутским трестом инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ) совместно с Южно-Якутским трестом инженерно-строительных изысканий (ЮжЯкутТИСИЗ). На указанной стадии на площадке жилого посёлка размером 600 на 600 м<sup>2</sup>, где были выполнены геофизические исследования, буровые работы производились по квадратной сетке с расстоянием между скважинами 150 м. Всего было пробурено 25 колонковых скважин до глубины 10–12 м с отбором проб керна на лабораторное определение показателей физико-механических свойств делювиально-элювиальных образований и массива осадочных пород. Кроме этого, по стволу каждой скважины была сделана одноразовая термометрия скважин с измерением температуры в основании будущих инженерных сооружений.

По данным буровых работ, грунтовое основание жилого посёлка, как и всей станции Кюргеллях, сложено мёрзлой толщей нижнекембрийских осадочных пород. Породы представляют собой переслаивание доломитов и известняков, Сверху породы покрыты четвертичными и древними делювиально-элювиальными образованиями. Литологические разности четвертичного возраста мощностью 0,4–2,1 м распространены повсеместно и сложены суглинком с включением дресвы, щебня и гравия осадочных пород. Древние образования кайнозойского или палеозойского возраста распространены фрагментарно в виде плотных ярко-красных и жёлтых песчанистых глин. В большинстве случаев глины залегали до глубины 1,6–2,8 м. Однако в примыкании к тектоническим зонам дробления осадочных пород глубина залегания нижней границы глин увеличивалась до 4,5–8,6 м. В самих зонах глины распространялись в узких углублениях, превышающих глубину бурения скважин, равную 10,0–11,7 м. В таких местах, например, в точках скважин № 901009 и № 901014, по данным метода дискретной георадиолокации с новой на тот период времени аппаратурой 17ГРЛ-1<sup>2</sup> глины древней коры выветривания распространялись до глубины 17–25 м.

<sup>1</sup> Так считает известный исследователь Южной Якутии геофизик Н.Н. Гриб [5], подкрепляя своё мнение ссылкой на известных учёных, внёсших свой вклад в механику грунтов — Г.Н. Кузнецова и В.Ю. Изаксона.

<sup>2</sup> Метод входил в состав изысканий вместе с методами ДИЗ и ДЭМП — дипольным электромагнитным профилированием, которое было выполнено прибором «ЭРА-625М» на 3-х разностях (45, 90, 180 м) и частоте 625 Гц.

Прочность как основное в строительном отношении механическое свойство осадочных пород была изучена на площадке жилого посёлка станции Кюргеллях по характеристике временного предела прочности на одноосное сжатие образцов скально-полускальных грунтов в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии. Образцы готовились в грунтовой лаборатории ЯкутТИСИЗ из монолитов в соответствии с ГОСТ 21135.2–84 [7]. Монолиты отбирались из керна скважин по схеме неравномерного избирательно-точечного опробования. Схема была принята в прошлом веке в НПО «Строизыскания» Госстроя РСФСР и до сих пор применяется в проектно-изыскательских организациях [22]. По этой схеме из керна скважин необходимо вынимать один-два монолита из каждой литологической разновидности грунта. В соответствии с этим правилом опробование прочности осадочных пород на площадке жилого посёлка было осуществлено на глубине 0,8–11,0 м. Наиболее часто монолиты отбирались на глубине ниже шести метров в относительно сохранной части массива осадочных пород, не подверженных сильному влиянию процессов выветривания, включая наиболее сильный разрушительный процесс криогенного метаморфизма [23].

По результатам лабораторных испытаний средняя прочность образцов осадочных пород, искусственно пропитанных водой, изменялась от 14,3 до 95,5 МПа при общем среднем значении 46,6 МПа. В большинстве случаев значения прочности составляли 26,2–67,0 МПа. При такой статистике и в соответствии с классификацией ГОСТ 25100–2020 [10] массив осадочных пород на площадке жилого посёлка относится к классу скальных грунтов средней категории прочности (15–50 МПа). Не лишне заметить, что по прогнозным вероятностным оценкам, полученным по данным метода ДИЗ, средняя прочность массива осадочных пород в водонасыщенном состоянии мало чем отличается от прочности в таком же состоянии лабораторных образцов пород и составляет 36,32–44,86 МПа [25].

По обобщённым данным [30, 11] криолитозона Южной Якутии имеет сложное строение прерывисто-островного типа мощностью в первые десятки-сотни метров. Характерной чертой такого строения является высотная и ландшафтно-геоморфологическая зональность мощности вечно-многолетне-мёрзлых и наиболее динамичных сезонномёрзлых геологических образований. Такая природная черта вместе с изначально неоднородной литогенной основой создаёт фрагментарно-мозаичную картину с крайне высокой изменчивостью по площади и глубине состава, свойств и состояния грунтового-геологической среды.

На станции Кюргеллях мощность вечно-многолетне-мёрзлых пород неизвестна. Однако, опираясь на фактически установленные и прогнозные вероятностные расчётные оценки М.Н. Железняк, полученные по уравнениям линейной регрессии для Лено-Алданского плато [11], мощность мерзлоты на исследуемом участке водораздельного пространства высотой 513–529 м может составлять 260–320 м. Что касается температуры, то она по результатам термометрии изыскательских скважин на станции Кюргеллях изменялась в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10 м от –0,4 до –2,3 °С при среднем значении –1,8 °С. При такой умеренно низкой температуре дисперсные и крупнообломочные элювиально-делювиальные разности, а также осадочные породы, выветренные до степени разрушения, называемой «рухляком» или «разборной скалой», находятся в твёрдомёрзлом состоянии.

Совокупное влияние неоднородности геологического, криогенного строения, а также петрофизическая изменчивость грунтового-геологической среды порождают и регулируют главное следствие. А именно, доминирующую среди множества мерзлотно-грунтовых факторов изменчивость механических свойств (прочностных и деформационных). Они в свою очередь формируют тенденции закономерной изменчивости исследуемых в настоящей статье электрофизических характеристик.

### Методика исследований

Методика ретроспективных исследований выстраивалась таким образом, чтобы в рамках имеющегося фактического материала опытно-производственных работ<sup>3</sup>, полученного на станции Кюргеллях, изучить ранее неизвестные информационные технологии новых методов геофизики в части расширения решаемых инженерно-геологических задач в криолитозоне Южной Якутии. В число новых методов наземной геофизики наряду с методом ДИЗ входил и метод дискретной георадиолокации.

Как уже отмечалось выше, фактический материал метода ДИЗ получен ЮжЯкутТИСИЗ на площадке жилого посёлка станции Кюргеллях при производстве комплексных инженерно-геологических изысканий ЯкутТИСИЗ в 1990–1991 гг. В ходе ретроспективного анализа данных ДИЗ, полученных по 25 скважинам, главное внимание уделялось изучению электрического сопротивления (далее — сопротивление) и вещественной части комплексной относительной диэлектрической проницаемости (далее — проницаемость).

Что касается теории метода ДИЗ, вопросов его применения, то они в достаточной мере обстоя-

<sup>3</sup> Организованных и финансируемых Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС, г. Москва)

тельно изложены в монографиях В.И. Иголкина и др. [13] и М.М. Задериголовы [12]. Дополнительные и полезные сведения о методе ДИЗ для практикующих геофизиков содержатся во временном руководстве А.В. Вешева и др. [2] и таком же по своей сути руководстве В.С. Титлинова и Р.Б. Журавлёвой [29], а также в работе автора настоящей статьи [24].

Измерения на площадке жилого посёлка станции Кюргеллях выполнялись с новой аппаратурой «СЭМЗ» в точках скважин и между ними на расстоянии от 50 до 100 м, руководствуясь инструкцией по эксплуатации [18] и общими правилами, установленными для методов геофизики, использующих переменный ток [14]. Принимая во внимание особенности геологического строения<sup>4</sup> станции Кюргеллях, измерения сделаны в четырёх азимутах по линиям взаимно перпендикулярных геофизических профилей.

На первом этапе полевых работ методом ДИЗ (летом 1991 г.) измерялись значения только ортогональных составляющих эллипса поляризации поля ВВМД. Это — значения модуля амплитуды напряжённости вертикальной (Hz) и горизонтальной (Hr) составляющей, измеренные на частоте 1,125 МГц в интервале разноса от 5 до 100 м. Заметим, что термином «разнос» при работе методом ДИЗ называют расстояние между точками расположения излучающей и приёмной антенны. На втором этапе (осенью 1991 г.) на нескольких опорных точках скважин<sup>5</sup> на частоте 1,125 и 0,281 МГц при увеличенном диапазоне разноса от 5 до 150 м были сделаны также в 4-х азимутах дополнительные параметрические измерения составляющих эллипса поляризации поля ВВМД. В их число вошли: 1) длина большой оси ( $a$ ); 2) длина малой оси ( $b$ ); 3) угол наклона ( $\psi$ ) большой оси к поверхности Земли.

### Ретроспективный анализ

Ретроспективный анализ данных метода ДИЗ, полученных на площадке жилого посёлка станции Кюргеллях, сделан с применением двух информационных технологий с целью оценки средних азимутальных эффективных значений сопротивления и проницаемости талых и твёрдомёрзлых делювиально-элювиальных образований и морозного массива осадочных пород. Обе технологии предусматривали применение лицензионной программы «Стадия» [20] для сортировки, группирования, ранжирования фактического материала вместе с изучением законов вероятностных распределений, а также математических статистик значений сопротивления и проницаемости

Первый вариант технологии — графический (палеточный). Он, кроме всего прочего, ценен тем, что предоставляет геофизику возможность получить корректную оценку сопротивления с учётом влияния проницаемости в области относительно высоких частот (0,281–2,250 МГц), применяемых при индуктивном зондировании грунтово-геологической среды с аппаратурой «СЭМЗ». При применении первого варианта были задействованы результаты определений всех составляющих эллипса поляризации поля ВВМД.

Второй вариант технологии — нетрадиционный. Он выбран ради удовлетворения научного интереса в части сравнения с оценками электрофизических характеристик, полученных по первому варианту. Для реализации второго варианта применялись данные комплекса методов геофизики (метода ДЭМП и метода дискретной георадиолокации).

Рассмотрим поочерёдно первый и второй технологические варианты решения задачи количественной оценки средних эффективных азимутальных значений сопротивления и проницаемости.

### Первый вариант информационной технологии

Оценка электрофизических характеристик по первому варианту состояла в выполнении трудоёмкой ручной работы с использованием альбома палеток В.Ф. Лебедева и др. [21]. Важным дополнением к альбому служила таблица-программа — Приложение № 3 к монографии В.И. Иголкина и др. [13]. Для заданных значений частоты и разноса исходными данными для работы с палетками и таблицей-программой служили значения Hz/Hr вместе со значениями длины большой ( $a$ ) и малой оси ( $b$ ) эллипса поляризации поля ВВМД и углом наклона ( $\psi$ ) большой оси эллипса к поверхности Земли.

Результат определения сопротивления и проницаемости мёрзлого грунтового основания площадки жилого посёлка на частоте 1,125 в диапазоне разноса 5–100 м и частоте 0,281 МГц в диапазоне разноса 5–150 м представлен в табл. 1 и 2. Количество определений в таблицах соответствует числу измерений по 25 скважинам 14 послойных значений эффективной глубины, которая сложным образом зависит от модуля комплексного волнового числа и производных от него электродинамических характеристик: приведённого расстояния и максимально возможной скин-глубины проникновения поля ВВМД в грунтовое основание.

Табличная статистика свидетельствует о том, что, в целом, на изученной площадке жилого посёлка эффективные значения сопротивления и

<sup>4</sup> Литогенная неоднородность массива осадочных пород и наложенная на неё изменчивость прочностного состояния пород вследствие действия тектонических процессов и процессов выветривания.

<sup>5</sup> В пяти точках, расположенных по углам и центру жилого посёлка, равномерно охватывающих его площадь.

проницаемости изменяются равным образом как на частоте 1,125 МГц, так и на частоте 0,281 МГц. На этом фоне единичные значения сопротивления изменяются на частоте 1,125 МГц от 583 до 1357 Ом·м при средних оценках 796–870 Ом·м. На частоте 0,281 МГц сопротивление повышается, но незначительно. Разброс единичных значений составляет 643–1682 Ом·м при средних оценках 643–971 Ом·м. Аналогичные значения проницаемости следующие. На частоте 1,125 МГц они изменяются от 3,1 до 7,8 отн. ед. при средних оценках 3,7–5,0 отн. ед. Смена частоты на 0,281 МГц привела, как и у сопротивления, к незначительному росту средних оценок до 3,9–5,6 отн. ед. при вариации единичных значений от 3,1 до 7,8 отн. ед.

Общая по площади жилого посёлка интегральная динамика изменчивости сопротивления и проницаемости на частоте 1,125 и 0,281 МГц, оцениваемая по коэффициенту вариации (табл. 1 и 2), невелика и составляет около 30 %.

На изученных частотах особняком от средних оценок (арифметической и медианной) выделяется модальная средняя оценка проницаемости равная 3,7 и 3,9 отн. ед. Объясняется этот статистический

нюанс влиянием группы часто встречающихся низких значений проницаемости, соответствующих доминированию в грунтовом основании площадки жилого посёлка льдистых делювиально-элювиальных образований и льдистой сильновыветренной верхней части массива осадочных пород на границе с этими образованиями.

#### Второй вариант информационной технологии

Эффективное значение сопротивления оценивалось по данным метода ДЭМП, а проницаемости — по данным метода дискретной георадиолокации. Со стороны метода ДЭМП применялись значения сопротивлений, определённые с помощью прибора «ЭРА-625М» на трёх разносах с одной частотой 625 Гц. Математическая обработка данных ДЭМП с разделением информационного пространства на фоновые и аномальные составляющие сопротивления разного порядка выполнялась с помощью программы «Lokon» [27]. Программа была написана в 1987 г. программистом «Якутгражданпроект» С.Г.Ивановой на языке ПЛ-1 для ЭВМ серии ЕС-1022, работающей в операционной системе DOS. Алгоритм программы с некоторыми изменениями и дополнениями заимствован авто-

**Табл. 1.** Статистика электрофизических характеристик мерзлого массива осадочных пород на частоте 1,125 МГц

*Tab. 1. Statistics of electrophysical characteristics of the frozen massif of sedimentary rocks at 1,125 MHz*

| Статистика описательная               | Проницаемость, отн.ед | Сопротивление, Ом·м |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Среднее арифметическое значение (САР) | 5,0                   | 870                 |
| Медианное среднее значение            | 4,7                   | 796                 |
| Модальное среднее значение            | 3,7                   | нет данных          |
| Стандартное отклонение                | 1,36                  | 256                 |
| Коэффициент вариации, %               | 27,3                  | 29,4                |
| Минимальное значение                  | 3,1                   | 583                 |
| Максимальное значение                 | 7,8                   | 1357                |
| Кол-во определений                    | 350                   | 350                 |
| Уровень надежности САР (95,0 %)       | 0,79                  | 148                 |

**Табл. 2.** Статистика электрофизических характеристик мерзлого массива осадочных пород на частоте 0,281 МГц

*Tab. 2. Statistics of electrophysical characteristics of the frozen massif of sedimentary rocks at 0,281 MHz*

| Статистика описательная               | Проницаемость, отн.ед | Сопротивление, Ом·м |
|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Среднее арифметическое значение (САР) | 5,6                   | 971                 |
| Медианное среднее значение            | 5,3                   | 889                 |
| Модальное среднее значение            | 3,9                   | 643                 |
| Стандартное отклонение                | 1,58                  | 319                 |
| Коэффициент вариации, %               | 28,2                  | 32,8                |
| Минимальное значение                  | 3,3                   | 643                 |
| Максимальное значение                 | 8,6                   | 1682                |
| Кол-во определений                    | 350                   | 350                 |
| Уровень надежности САР (95,0 %)       | 0,91                  | 184                 |

ром настоящей статьи из работы А.А. Никитина [26]. В настоящее время математическую обработку данных ДЭМП, как и других методов геофизики, можно выполнять с помощью многоцелевой программы «Coscad-3D», работающей в операционной системе Windows [19].

Со стороны георадиолокации применялись значения скорости распространения электромагнитной волны, определённые с помощью аппаратуры «17ГРЛ-1» в частотном диапазоне 30–150 МГц. Интервальные и послойные оценки скорости были получены по новой ранее неизвестной информационной технологии групповых измерений сигналов георадиолокации в окрестности точек скважин с изменением положения и ориентации излучающей и приёмной антенн [27]. Параметрические определения скорости сделаны на каждой из 25 изыскательских скважин с привязкой к инженерно-геологическим элементам (ИГЭ). Эти элементы представляют собой важнейший интеллектуальный результат работы геологов-изыскателей в части обобщения и упорядочивания строения, состава, свойств и состояния массива осадочных пород по данным буровых и лабораторных работ. В связи с этим замечанием позволим себе сделать небольшой познавательный экскурс касательно ИГЭ.

Понятие ИГЭ и методику его выделения на основе применения методов математической статистики впервые предложил в 1956 г. выдающийся учёный геолог Н.В. Коломенский в соавторстве с И.С. Комаровым. Об этом малоизвестном факте, который сообщил автору настоящей статьи В.А. Комаров, свидетельствует учебник по инженерной геологии [15], а также другие работы Н.В. Коломенского, в которых он развивал идею применения ИГЭ [16, 17]. Что касается обязательного применения ИГЭ в практике инженерной геологии и инженерно-строительных изысканий, то оно было официально утверждено гораздо позже предложения Н.В. Коломенского и И.С. Комарова — сначала с введением ГОСТ 20522–75 [6], затем ГОСТ 20522–96 [8] и наконец ГОСТ 20522–2012 [9].

Вернёмся ко второму варианту информационной технологии количественной оценки эффективных значений сопротивления и проницаемости.

Оценка сопротивления на частоте 1,125 и 0,281 МГц сделана по понижающему коэффициенту. Его значение, равное двум, взято из работы М.Л. Власова [3, с. 14]. В ней для осадочных пород приведена таблица пересчёта значений сопротивления на постоянном токе (нулевой частоте) в сопротивление на переменном токе для частоты 75 МГц. Конечно, разница между используемыми методом ДИЗ частотами 1,125 и 0,281 МГц и табличной частотой 75 МГц велика. Однако её можно не учитывать, принимая во внимание существование так называемого «георадарного плато», в пределах которого в диапазоне частот 106–109 Гц значения

электрофизических характеристик теоретически постоянно [31].

Исходными данными для применения понижающего коэффициента служили значения сопротивления, определённые по данным ДЭМП на трёх разнотах (расстоянии между измерительным и излучающим диполями). Первый разнос 45 м характеризовал сопротивление преимущественно льдистых делювиально-элювиальных отложений и верхней наиболее выветренной части массива осадочных пород до глубины 4,5 м. Второй и третий разнос 90 и 180 м характеризовали суммарное сопротивление верхней-средней и верхней-средней-нижней части массива в разной степени трещиноватых осадочных пород до глубины 13 и 36 м соответственно. Пересчёт значений разнота в масштаб глубины осуществлялся умножением на значения эмпирических коэффициентов, установленных для криолитозоны Южной Якутии в результате многолетней работы геофизиков ЮжЯкутГИСИЗ с помощью метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на постоянном токе. Для первого разнота применялся коэффициент 1/10, т.е. значение разнота уменьшалось в 10 раз. Для второго и третьего разнота — коэффициенты 1/7 и 1/5 соответственно.

Точно такой же давно апробированный в общем порядке подход применяется для оценки глубины залегания границ геоэлектрического разреза в современном методе электротомографии. Настораживает другое. Почему в разных местах России глубина залегания грунтово-геологических границ в совершенно разных инженерно-геологических условиях оценивается в методе электротомографии по одному то ли теоретическому, то ли эмпирическому зарубежному коэффициенту, равному 1/2,63 [32]? Ведущие отечественные специалисты в области электротомографии В.А. Щевнин, И.Н. Модин, А.А. Бобачёв не приводят в своих публикациях ответ на поставленный вопрос.

С применением вышеприведённых отечественных эмпирических коэффициентов на первом интервале глубины 0,0–4,5 м сопротивление изменялось от 100 до 1000 Ом·м при среднем значении 326 Ом·м. На втором интервале глубины 0–13 м сопротивление изменялось от 300 до 2400 Ом·м при среднем значении 1670 Ом·м. На третьем интервале глубины 0–36 м общий средний фон сопротивления повышается до 3112 Ом·м при вариациях от 400 до 3600 Ом·м. С учётом доли приращения интервалов глубины общее средневзвешенное значение сопротивления на частоте 625 Гц составляет 2400 Ом·м. С поправкой на понижающий коэффициент 2,0 получаем для близких частот 1,125 и 0,281 МГц среднюю оценку сопротивления 1200 Ом·м. Она свидетельствует, что, в целом, мерзлое грунтовое основание площадки жилого посёлка станции Кюргеллях относится к категории высокоомных геологических сред.

Оценка проницаемости на частоте 1,125 и 0,281 МГц сделана также с учётом существования «георадарного плато», на которое ссылается М.Л.Владов и М.С. Судакова [4]. Для решения этой задачи была применена известная в георадиолокации формула<sup>6</sup>. В преобразованном виде запись формулы приведена ниже:

$$\varepsilon = \left( \frac{0,299}{\nu} \right)^2,$$

где  $\varepsilon$  — проницаемость в отн. ед.; 0,299 — скорость распространения света в вакууме в м/нс;  $\nu$  — скорость распространения электромагнитной волны в грунтово-геологической среде в м/нс в частотном диапазоне аппаратуры 17РЛ-1 равном 30–150 МГц.

Групповые средние медианные значения скорости распространения электромагнитной волны вычислены по ИГЭ №№ 9–11 для нерасчленённого совместного слоя четвертичных и древних делювиально-элювиальных образований (0,083 м/нс), а также для массива осадочных пород (0,104 м/нс). Подставляя их в вышеприведённую формулу, получим соответствующие групповые средние значения проницаемости, равные 13,1 и 8,3 отн. ед. Общая средневзвешенная оценка проницаемости для всего изученного грунтового основания площадки жилого посёлка станции Кюргеллях равна с округлением 10 отн. ед.

Результат оценки по второму информационно-технологическому варианту удостоверяет, что высокому сопротивлению мёрзлых грунтов соответствует не низкое, как обычно, а повышенное значение проницаемости. Такая же особенность отмечена в монографии В.И. Иголкина и др. [13] при производстве работ методом ДЭМП на одном из дражных полигонов добычи россыпного золота в криолитозоне Забайкальского края. В этом случае эффект нетипичного рассогласованного поведения электрофизических характеристик (низкого сопротивления 1500 Ом·м и высокой проницаемости 20 отн.ед.) объясняется гипотетическим присутствием в талых рыхлых отложениях линзы льда, играющей роль природного микроконденсатора.

В рассматриваемом случае таким, но уже макроконденсатором, по всей вероятности служит совокупность включений сегрегационного и трещинно-жильного льда, заполняющих сверху до низу всё изученное пространство высокоомной грунтово-геологической среды. В принятом электротехническом варианте объяснения систему микроиндуктивных катушек представляют повсеместно присутствующие суглинки и глины, запол-

няющие промежутки между крупнообломочным материалом делювия-элювия и трещины в массиве осадочных пород. В результате и образуется независимое друг от друга долевое влияние факторов льдистости и глинистости на электрофизические характеристики. Первый фактор регулирует преимущественно сопротивление, а второй фактор — проницаемость.

Сравним общие средние оценки электрофизических характеристик по первому и второму варианту. По первому варианту они равны 834 Ом·м и 4,7 отн. ед., а по второму варианту — 1200 Ом·м и 10,0 отн. ед. Относительная разница существенна, но в части решения задачи количественной оценки эффективной глубины послойного проникновения поля ВВМД имеет разное значение. Разница в сопротивлениях слабо влияет на результат оценивания эффективной глубины, а вот разница в проницаемости влияет на этот результат сильнее. Разные варианты расчёта модуля комплексного волнового числа и анализ соотношения его вещественной и мнимой части убеждают, что в рассматриваемом случае определяющий вклад в оценку эффективной глубины вносит не проницаемость, а сопротивление.

Добавим к результату сравнения региональные оценки сопротивления и проницаемости осадочных пород, полученные в Западной Якутии А.Г. Бондаренко и др. [1] в полевых и лабораторных условиях в диапазоне частот 100–1000 Гц и 0,312–25,0 МГц по монолитам керна скважин. Цель дополнения — получить независимую оценку трёх рассмотренных вариантов информационных технологий путём применения внешней экспертизы с верификацией достоверности частных оценок сопротивления и проницаемости. Указанный источник информации подтверждает достоверность этих оценок, а также их нетипичное<sup>7</sup>, но закономерное изменение между собой в широком частотном диапазоне. Близкие к однородным доломитам и известнякам станции Кюргеллях мёрзлые и смешанные по составу осадочные породы Западной Якутии (известковистые доломиты и известняки доломитизированные) с температурой минус 3–5 °С в сопоставимом частотном диапазоне имеют средние значения сопротивления и проницаемости одного порядка. На частотах изучения керна осадочных пород, приблизительно равных используемым в методе ДИЗ частотам 1,125 и 0,281 МГц, сопротивление составляет около 800–1200 Ом·м, а проницаемость — около 20–28 отн. ед. Разницы по сопротивлению почти нет, а по проницаемости она существенна. Авторы приведённой статьи [1]

<sup>6</sup> Формула применяется для высокоомных геологических сред с сопротивлением геологической среды, начиная примерно с 1000 Ом·м и выше, при условии соблюдения преобладания токов смещения над токами ионной проводимости, когда тангенс диэлектрических потерь во много раз меньше единицы.

<sup>7</sup> Высокому сопротивлению соответствует не низкая, а высокая проницаемость.

объясняют высокие значения проницаемости при-  
сущей осадочным породам Западной Якутии высо-  
кой глинистостью, пористостью и засоленностью.

Добавленный источник информации [1] важен  
ещё и тем, что верифицирует значение приме-  
нённого понижающего коэффициента, взятого из  
работы М.Л. Влодова [3]. Для разных типов пород  
(мергелей и преимущественно сложных по составу  
известняков) разница между сопротивлениями на  
постоянном токе и частотой 5 МГц систематически  
уменьшается по закону частотной дисперсии в 1,8–  
3,6 раза при среднем медианном значении равном  
2,1 раз. То есть выбор значения понижающего со-  
противления, равного двум, сделан правильно.  
Более того, это и есть тот редкий случай, когда в  
частном порядке подтверждается корректность  
теоретических представлений в части постоянства  
значений электрофизических характеристик в пре-  
делах «георадарного плато» в частотном диапазоне  
106–109 Гц [27].

Подведём итог ретроспективного анализа в  
двух выводах.

Во-первых, в случаях острой необходимости  
(недостатка времени, недостаточной квалифи-  
кации инженерно-технического персонала, уча-  
ствующего в полевых работах методом ДИЗ, или  
по иным причинам и обстоятельствам) можно не  
выполнять длительные измерения всех составля-  
ющих эллипса поляризации поля ВВМД и по ним  
не оценивать сложным и утомительным ручным  
путём без использования компьютерной техники  
эффективные значения сопротивления и прони-  
цаемости грунтового-геологической среды. Всё это  
можно заменить применением более простых, но

не менее достоверных информационных техноло-  
гий, используя данные методов дискретной гео-  
радиолокации и ДЭМП.

Во-вторых, не столь большая вариативность  
приблизительных<sup>8</sup> общих средних оценок сопро-  
тивления, полученных разными путями (по эл-  
липсу поляризации и без него) существенно не  
изменяет глубины изучения методом ДИЗ электро-  
физических характеристик.

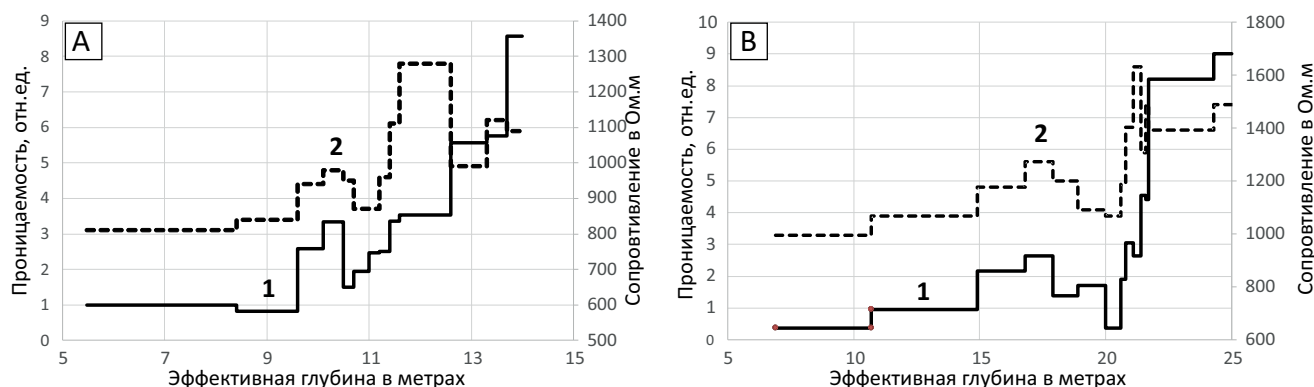
### Обсуждение результатов

Обсудим результаты ретроспективного анализа  
с разных сторон, осмысливая динамику электрофизи-  
ческих характеристик в зависимости от частоты и  
глубины проникновения поля ВВМД в мёрзлую тол-  
щу делювиально-элювиальных образований и оса-  
дочных пород на площадке жилого посёлка станции  
Кюргеллях. Обозначенная динамика показана на  
рисунках 1 и 2 в сравнении с динамикой прочности  
массива осадочных пород на рисунке 3. Начальная  
глубина на частоте 1,125 и 0,281 МГц практически  
одинакова и составляет 5,5–6,9 м соответственно.  
Конечная глубина различается сильно. На частоте  
1,125 МГц она равна 14,0 м, а на частоте 0,281 МГц —  
25,0 м.

Общей закономерной чертой динамики явля-  
ется рост с глубиной как сопротивления, так и про-  
ницаемости с локальными разноамплитудными  
вариациями в ту или иную сторону. Будучи след-  
ствием, такой характер динамики порождён в слое  
фоновое зонального выветривания и слое годовых  
теплооборотов природными причинами — а имен-  
но, распределением по глубине локально неоднор-  
одного блочно-ячеистого тектонического строе-  
ния с наложенным на это распределение такого же

**Рис. 1.** Обобщённая совместная динамика электрофизических характеристик на частоте 1,125 МГц (А) и 0,281 МГц (В) в зависи-  
мости от глубины изучения методом ДИЗ грунтового основания площадки жилого посёлка Кюргеллях: 1 — сопротивление; 2 —  
проницаемость

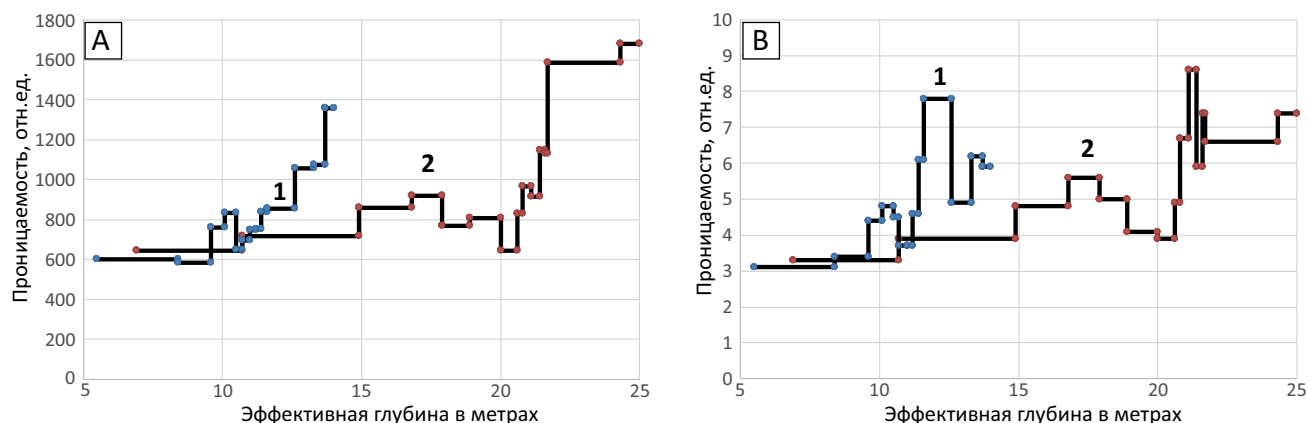
*Fig. 1. The generalized joint dynamics of the electrophysical characteristics at a frequency of 1.125 MHz (A) and 0.281 MHz (B) depending on  
the depth of study by the DIS method of the soil foundation of the site of the residential village Kyurgellakh: 1 — resistance; 2 — permeability*



<sup>8</sup> Точные оценки могут быть получены только по образцам пород в лабораторных условиях и отчасти при электриче-  
ском каротаже скважин.

**Рис. 2.** Обобщённая групповая динамика сопротивления (А) и проницаемости (В) в зависимости от глубины изучения методом ДИЗ грунтового основания площадки жилого посёлка Кургеллях: 1 — частота 1,125 МГц; 2 — 0,281 МГц

Fig. 2. Generalized group dynamics of resistance (A) and permeability (B) depending on the depth of study by the DIS method of the soil base of the site of the residential village Kyurgellakh: 1 — frequency 1.125 MHz; 2 — 0.281 MHz



локально неоднородного, но в ещё большей степени непостоянного, неустойчивого прочностного и криогенного состояния мёрзлой толщи делювиально-элювиальных образований и осадочных пород.

На общем фоне роста сопротивления и проницаемости выделяются два участка с разным темпом. Граница резкой смены темпа роста зависит от частоты. На высокой частоте 1,125 МГц граница расположена на глубине около 10 м. На частоте 0,281 МГц граница залегает на глубине около 20 м. Возникает вопрос: это одна граница или две разные границы? Если принимать во внимание только действие процесса частотной дисперсии, то это одна граница, положение которой регулируется частотой. В таком случае возникает нежелательная ситуация неопределённости и неоднозначности. Однако при внимательном рассмотрении связи динамики электрофизических характеристик с инженерно-геологическим строением грунтового основания площадки жилого посёлка обнаруживается ошибочность ответа на поставленный вопрос.

В действительности резкая смена электрофизических характеристик возникает по разным природным причинам. На чувствительной к изменению криогенного состояния пород и грунтов частоте 1,125 МГц этот электродинамический эффект на глубине около 10 м вызван затуханием наиболее сильного влияния процессов физического выветривания и, в меньшей степени, процессов химического выветривания. Частота 0,281 МГц не даёт такой чувствительности к изменению состава, свойств и состояния пород и грунтов в зоне выветривания, но сильнее реагирует на изменение их механического (прочностного) состояния в слое годовых теплооб-

ротов, которое кардинальным образом консолидируется и усиливается, начиная с глубины залегания нижней границы слоя в целом, равной около 20 м. Именно здесь, где межгодовые вариации среднегодовой температуры не превышают  $\pm 0,1^\circ\text{C}$ , начинается область термического покоя. В ней массив осадочных пород перестаёт испытывать знакопеременные сезонные механические напряжения (сжатия-расширения при понижении-повышении температуры в зимне-весенний и летне-осенний периоды года соответственно), которые приводят к образованию дополнительной<sup>9</sup> системы трещин и снижению прочности пород. Аналогичным образом объясняется причина образования двух локальных аномалий повышенной проницаемости, но с совершенно разным характером изменчивости (рис. 2В). Они очень интересны с точки зрения использования характеристики проницаемости в части обнаружения неоднородностей грундово-геологической среды и изучения границ их распространения по площади и, в частности в обобщённом виде, по глубине.

Первая аномалия проницаемости с максимумом около 8,0 отн. ед. обнаружена на частоте 1,125 МГц на глубине 11,4–12,6 м. Природа этой аномалии, соответствующая неоднородности грундово-геологической среды с обобщённой средней мощностью 1,2 м, в точности не известна, но предположительно связана с преимущественным распространением на отмеченной глубине серии локальных высокоглинистых образований древней коры выветривания. Такие образования в инженерной геологии называют закрытыми карстовыми полостями.

<sup>9</sup> Вдобавок к трещинам тектонического происхождения.

Вторая аномалия проницаемости с узким максимумом, достигающим 8–9 отн. ед, обнаружена на частоте 0,281 МГц на глубине 20,6–21,7 м с обобщённой средней мощностью 0,9 м. Природу этой аномалии можно предположительно объяснить двумя способами. Первый вариант объяснения допускает связь с глубинным карстом на горизонте тектонического дробления осадочных пород с последующим образованием серии распределённых по латерали локальных пустот, заполненных глинистым материалом. То есть это, опять же, образования древней коры выветривания, но расположенные на значительной глубине. Второй вариант объяснения не менее значим в допущении его истинности в сравнении с первым вариантом. В этом варианте место глубинного карста занимают в массиве доломитов прослои наиболее глинистых образований — известняков.

Всё вместе взятое, включая результаты псевдокаротажа прочности осадочных пород (рис. 3), образует по данным метода ДИЗ насыщенное в своей полноте и разнообразии информационное пространство, удостоверяющее неоднородное строение и состояние массива осадочных пород в горизонтальном и вертикальном направлении. В этом пространстве особое место с точки зрения прикладных наук о Земле занимают результаты псевдокаротажа прочности осадочных пород. Они со стороны геофизики подчёркивают особую, если не сказать первостепенную, значимость тепловых свойств мёрзлых грунтов. Речь идёт о влиянии этих свойств как на формирование мощности слоя годовых те-

плооборотов, так и на прочность в этом слое осадочных пород вместе с их электрофизическими характеристиками. В зонах разрывной тектоники, где массив осадочных пород раздроблен и перемешан последующими экзогенными процессами до состояния чистого глинистого материала (глин древней коры выветривания) или с примесями крупнообломочного материала (дресвы, щебня и гравия осадочных пород), теплопроводность снижается, а теплоёмкость увеличивается. Вне зон тектоники, где массив осадочных пород хотя и выветрен и затронут тектоническими процессами трещинообразования, но сохраняет целостное состояние, теплопроводность увеличивается, а теплоёмкость уменьшается. Благодаря этому разнонаправленные тепловые потоки<sup>10</sup> проникают на разную глубину, формируя в своей длительной геологической деятельности разный по мощности слой годовых теплооборотов. В зонах тектоники нижняя граница слоя залегает на глубине 15–16 м, а вне зон — на глубине 18–20 м. Эти оценки не противоречат общей оценке мощности слоя годовых теплооборотов [26].

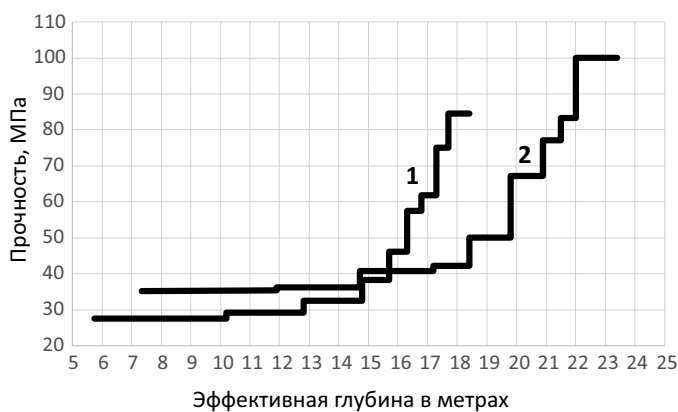
### Заключение

Апробация технологии изучения методом ДИЗ затухания поля ВВМД на частоте 1,125 и 0,281 МГц и разnose от 5 до 100–150 м выполнена на станции Кюргеллях в сложных инженерно-геологических условиях, присущих всей прерывисто-островной криолитозоне Южной Якутии.

Ретроспективный анализ данных метода ДИЗ с использованием программы «Стадия» [X] установил следующее.

**Рис. 3.** Дискретные графики псевдокаротажа на частоте 0,281 МГц. средней прочности массива осадочных пород прогнозируемого в водонасыщенном состоянии по данным метода ДИЗ на площадке жилого посёлка станции Кюргеллях: 1 — в зонах разрывных тектонических нарушений; 2 — вне зон на участках распространения консолидированных осадочных пород

*Fig. 3. Discrete plots of pseudo-logging at a frequency of 0.281 MHz. medium-strength sedimentary rock mass predicted in a water-saturated state according to the DIZ method at the site of the residential settlement of the Kyurgellakh station: 1 — in zones of discontinuous tectonic faults; 2 — outside the zones in the areas of distribution of consolidated sedimentary rocks*



<sup>10</sup> Зимой-весной вверх из нагретого летом-осенью массива и наоборот, вверх из остывающего массива, в холодный период года)

1. На обозначенных частотах и разnose изучение электрофизических характеристик высокоомной толщи твёрдомёрзлых льдистых делювиально-элювиальных образований и залегающих под ними морозных осадочных пород (доломитов, известняков) выполнено в интервале глубины от 5–7 до 14–25 м.

2. Совокупная льдистость и глинистость делювия-элювия и в меньшей степени, массива осадочных пород порождают нетипичное в геоэлектрике на переменном токе рассогласованное изменение по глубине с общим ростом сопротивления и проницаемости.

3. Резкий рост электрофизических характеристик происходит на двух структурно-петрофизических границах, Первая граница, залегающая на глубине около 10 м, соответствует максимальной глубине интенсивного выветривания осадочных пород. Вторая граница, залегающая на глубине около 20 м, соответствует положению кровли консолидированного скального массива осадочных пород прочной категории.

4. Положение по глубине отмеченных границ в разной мере контролируется тепловыми и механи-

ческими свойствами делювия-элювия и осадочных пород.

5. Вне зон разрывных тектонических нарушений глубина проникновения разнонаправленных по вертикали тепловых потоков, а значит и глубина залегания нижней границы слоя годовых теплооборотов достигают максимальных значений 18–20 м. В заглинизированных зонах тектоники с затруднённым теплообменом нижняя граница обозначенного слоя залегает на меньшей глубине, равной 15–16 м.

Перечисленные результаты удостоверяют положительный итог апробации технологии изучения затухания поля ВВМД в части решения задач петрофизики и теплофизики. Наиболее важной в решении задач теплофизики методом ДИЗ следует считать задачу прогнозную оценку мощности слоя годовых теплооборотов, что частично или полностью освобождает проектно-изыскательские организации от необходимости организации дорогой, трудоёмкой и длительной сети режимной термометрии скважин глубиной до 30–50 м, т.е. до максимально возможной в криолитозоне Южной Якутии мощности слоя годовых теплооборотов.

#### Список источников

1. Бондаренко А.Т., Ковалев Ю.Д., Стогова В.А. Физические свойства карбонатных пород Западной Якутии по данным измерений на естественно-мерзлом керне // Геология и геофизика. – 1989. – Т. 30. – № 7. – С. 121–128.
2. Вешев А.В., Любцева Е.Ф., Леончиков В.М., Алексеев В.М. Временное руководство по методу электромагнитного зондирования с вертикальным магнитным диполем. – Москва: Министерство цветной металлургии СССР, 1978. – 45 с.
3. Владов М.Л. Георадиолокационные исследования по автодорогам : учебное пособие. – Тверь: ГЕРС, 2012. – 192 с.
4. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация: от физических основ до перспективных направлений : учебное пособие. – М. : ГЕОС, 2017. – 240 с.
5. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. – Новосибирск: Наука, 1999. – 240 с.
6. ГОСТ 20522–75. Грунты. Метод статистической обработки результатов определений характеристик / Государственный комитет Совета Министров СССР по делам строительства. – М. : Издательство стандартов, 1976. – 13 с.
7. ГОСТ 21135.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – М. : Издательство стандартов, 1984. – 7 с.
8. ГОСТ 20522–96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний / Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС). – М. : Издательство стандартов, 1997. – 24 с.
9. ГОСТ 20522–2012. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. – М. : Стандартиформ, 2013. – 16 с.
10. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. – Москва: Стандартиформ, 2020. – 38 с.
11. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. – Новосибирск: Наука, 2005. – 227 с.
12. Задегирогова М.М. Радиоволновой метод в инженерной геологии и геоэкологии. – М. : МГУ, 1998. – 320 с.
13. Иголкин В.И., Шайдунов Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе. – Красноярск: СФУ, 2016. – 272 с.
14. Инструкция по электроразведке / под ред. Г.С. Франтова. – Л. : Недра, 1984. – 534 с.
15. Коломенский Н.В. Инженерная геология. Учебник для геологоразведочных техникумов. – Т. 2. – Ч. 2. – М.: Госгеолиздат, 1956. – 320 с.
16. Коломенский Н.В. Общая методика инженерно-геологических исследований. – М. : Недра, 1968. – 342 с.
17. Коломенский Н.В. Некоторые проблемы развития инженерной геологии // Пути дальнейшего развития инженерной геологии : материалы дискуссии 1-го Международного конгресса по инженерной геологии. – М. : МГУ, 1971. – С. 36–40.

18. Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования. Техническое описание. – Красноярск, Сибцветметавтоматика, 1991. – 30 с.
19. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «Коскад 3D». Версия 2008.1. – Ч. 1. – М. : РГГРУ, 2008. – 118 с.
20. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных / 4-е изд. – М. : Форум; ИНФРА-М, 2006. – 512 с.
21. Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. – Красноярск: Сибцветметавтоматика, 1991. – 83 с.
22. Левкович А.И. Методика обоснования состава и объёмов инженерно-геологических изысканий для строительства различных типов зданий и сооружений промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения в районах распространения вечномёрзлых грунтов с учётом требований проектирования. – М.: Стройизыскания, 1989. – 173 с.
23. Мельников А.Е., Павлов С.С., Колодезников И.И. Разрушение пород насыпи новой железнодорожной линии Томмот-Кердём Амуро-Якутской магистрали под воздействием криогенного выветривания [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> (дата обращения: 13.09.2023).
24. Нерадовский Л.Г. Ошибки средних оценок прочности массивов осадочных пород Южной Якутии по данным метода дистанционного индуктивного зондирования // Геоинформатика. – 2023. – № 1. – С. 48–62. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-1-48-62.
25. Нерадовский Л.Г. Аprobация и верификация за пределами г. Нерюнгри вероятностной модели прогноза прочности осадочных пород [электронный ресурс] // Вестник евразийской науки. – 2023. – Том 15. – № 4. – 02NZVN423. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/02NZVN423.pdf> (дата обращения: 13.09.2023).
26. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. – М. : Недра, 1979. 280 с.
27. Программа обработки данных многоканального электропрофилирования способом обратной вероятности для линейных изысканий. Стадия – автоматизация камеральных работ. – Якутск : ЯкутТИСИЗ, 1987. – 21 с.
28. Способ георадиолокации многолетнемёрзлых пород: патент на изобретение 2490671 Рос. Федерация / Л. Г. Нерадовский ; заявитель Л. Г. Нерадовский. – № 2011125238/28; заявлено 17.06.2011 ; опубликовано 20.08.2013. – Бюллетень № 23. – 11 с.
29. Титлинов В.С., Журавлёва Р.Б. Технология дистанционных индуктивных зондирований. – Екатеринбург : Наука, 1995. – 56 с.
30. Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. – М. : МГУ, 1975. – 444 с.
31. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / ed. by H. M. Jol. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 523 p.
32. Edwards L.S. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization // Geophysics. – 1977. – Vol. 42. – No 5. – P. 1020–1036. DOI: 10.1190/1.1440762.

## References

1. Bondarenko A.T., Kovalev Yu.D., Stogova V.A. Fizicheskie svoistva karbonatnykh porod Zapadnoi Yakutii po dannym izmerenii na estestvenno-merzлом kerne [Physical properties of carbonate rocks of Western Yakutia according to measurements on a naturally frozen core]. *Geologiya i geofizika*. 1989;30(7):121–128.
2. Veshev A.V., Lyubtseva E.F., Leonchikov V.M., Alekseev V.M. Vremennoe rukovodstvo po metodu ehlektromagnitnogo zondirovaniya s vertikal'nym magnitnym dipolem [Interim guide for using the electromagnetic sounding method with a vertical magnetic dipole]. Moscow: Ministerstvo tsvetnoi metallurgii SSSR; 1978. 45 p.
3. Vladov M.L. Georadiolokatsionnye issledovaniya po avtodorogam : uchebnoe posobie [Georadar research on roads: tutorial]. Tver: GERS; 2012. 192 p.
4. Vladov M.L., Sudakova M.S. Georadiolokatsiya: ot fizicheskikh osnov do perspektivnykh napravlenii: uchebnoe posobie [Ground-penetrating radar: from physical foundations to promising areas: tutorial]. Moscow: GEOS; 2017. 240 p.
5. Grib N.N., Samokhin A.V. Fiziko-mekhanicheskie svoistva uglevmeshchayushchikh porod Yuzhno-Yakutskogo basseina [Physico-mechanical properties of coal-bearing rocks in the South Yakutian basin]. Novosibirsk: Nauka; 1999. 240 p.
6. GOST 20522–75. Grunty. Metod statisticheskoi obrabotki rezul'tatov opredelenii kharakteristik [National Standard 20522–75. Soils. Method for statistical processing of characteristics determination results]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1976. 13 p.
7. GOST 21135.2–84. Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii [National Standard 21135.2–84. Rocks. Methods for determination of axial compression strength]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1984. 7 p.
8. GOST 20522–96. Grunty. Metody statisticheskoi obrabotki rezul'tatov ispytaniy [National Standard 20522–96. Soils. Methods for statistical processing of test results]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1997. 24 p.
9. GOST 20522–2012. Grunty. Metody statisticheskoi obrabotki rezul'tatov ispytaniy [National Standard 20522–2012. Soils. Methods for statistical processing of test results]. Moscow: Standartinform; 2013. 16 p.
10. GOST 25100–2020. Grunty. Klassifikatsiya [National Standard 25100–2020. Soils. Classification]. Moscow: Standartinform; 2020. 38 p.
11. Zheleznyak M.N. Geotemperaturnoe pole i kriolitizona yugo-vostoka Sibirskoi platformy [Geotemperature field and permafrost zone of the southeast of the Siberian platform]. Novosibirsk: Nauka; 2005. 227 p.
12. Zaderigolova M.M. Radiovolnovoi metod v inzhenernoi geologii i geoekologii [The radiowave method in engineering geology and environmental geology]. Moscow: MGU; 1998. 320 p.
13. Igolkin V.I., Shaidurov G.YA., Tronin O.A., Khokhlov M.F. Metody i apparatura ehlektrozvedki na peremennom toke [Methods and equipment for AC electrical resistivity surveying]. Krasnoyarsk: SFU; 2016. 272 p.
14. Frantov G.S. (ed.). Instruksiya po ehlektrozvedke [Tutorial on resistivity methods]. Leningrad: Nedra; 1984. 534 p.
15. Kolomenskii N.V. Inzhenernaya geologiya. Uchebnik dlya geologorazvedochnykh tekhnikumov. [Engineering geology. Textbook for geol.-reconnaissance. technical schools]. Vol. 2. Pt. 2. Moscow: Gosgeolizdat; 1956. 320 p.

16. Kolomenskii N.V. Obshchaya metodika inzhenerno-geologicheskikh issledovaniy [General methodology of engineering-geological research]. Moscow: Nedra; 1968. 342 p.
17. Kolomenskii N.V. Nekotorye problemy razvitiya inzhenernoi geologii [Some problems in the development of engineering geology]. In: Puti dal'nishnego razvitiya inzhenernoi geologii : materialy diskussii 1-go Mezhdunarodnogo kongressa po inzhenernoi geologii. Moscow: MGU; 1971. pp. 36–40.
18. Kompleks srednechastotnoi apparatury ehlektromagnitnogo zondirovaniya. Tekhnicheskoe opisanie [SEMZ system for medium-frequency electromagnetic sounding. Specifications]. Krasnoyarsk: Sibsvetmetavtomatika; 1991. 30 p.
19. Kompleks spektral'no-korrelyatsionnogo analiza dannykh «Koskad 3D». Versiya 2008.1 [Complex of spectral-correlation data analysis Coscad-3D. Version 2008.1]. Pt. 1. Moscow: RGGRU; 2008. 118 p.
20. Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and tools for integrated data analysis]. 4th edn. Moscow: Forum; INFRA-M; 2006. 512 p.
21. Lebedev V.F., Onushchenko V.I., Litvintseva L.M. Kompleks SEhMZ. Metodicheskoe posobie [SEMZ system. A methodological guideline]. Krasnoyarsk: Sibsvetmetavtomatika; 1991. 83 p.
22. Levkovich A.I. Metodika obosnovaniya sostava i ob'emov inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy dlya stroitel'stva razlichnykh tipov zdaniy i sooruzheniy promyshlennogo, sel'skokhozyaistvennogo i zhilishchno-grazhdanskogo naznacheniya v raionakh rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov s uchedom trebovaniy proektirovaniya [Methodology for substantiating the composition and volume of engineering-geological surveys for the construction of various types of buildings and structures for industrial, agricultural and residential-civil purposes in areas of permafrost, taking into account design requirements]. Moscow: Strojizyskaniya; 1989. 173 p.
23. Melnikov A.E., Pavlov S.S., Kolodeznikov I.I. Rock destruction of the body of railroad of the Tommot-Kerem Amur-Yakutsk new line under the influence of the frost weathering. *Modern problems of science and education*. 2014;(2). Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12945> (accessed 13.09.2023).
24. Neradovskii L.G. Errors in average strength estimates of sedimentary rock masses in South Yakutia based on geometric induction sounding data. *Geoinformatika*. 2023;(1):48–62. DOI: 10.47148/1609-364X-2023-1-48-62.
25. Neradovskii L.G. Approbation and verification outside the city of Neryungri of a probabilistic model for predicting the strength of sedimentary rocks. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(4):02NZVN423. Available at: <https://esj.today/PDF/02NZVN423.pdf> (accessed 13.09.2023).
26. Nikitin A.A. Statisticheskie metody vydeleniya geofizicheskikh anomalii [Statistical methods for identifying geophysical anomalies]. Moscow: Nedra; 1979. 280 p.
27. Programma obrabotki dannykh mnogoraznosnogo ehlektroprofilirovaniya sposobom obratnoi veroyatnosti dlya lineinykh izyskaniy. Stadiya – avtomatizatsiya kameral'nykh rabot [The program for processing data of multi-space electrical profiling by the method of inverse probability for linear surveys. Stage- automation of office work]. Yakutsk: YakutTISIZ; 1987. 21 p.
28. Sposob georadiolokatsii mnogoletnemerzlykh porod [The method of georadiolocation of permafrost]: patent 2490671 Rus. Federation. L. G. Neradovskii; applicant L. G. Neradovskii. № 2011125238/28. Claimed 17.06.2011; published 20.08.2013. Bulletin No. 23. 11 p.
29. Titlinov V.S., Zhuravleva R.B. Tekhnologiya distantsionnykh induktivnykh zondirovaniy [The technology of distance inductive sounding]. Yekaterinburg: Nauka; 1995. 56 p.
30. Kudryavtsev V.A. (ed.). Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskies i inzhenerno-geologicheskies usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo raiona [Southern Yakutia: permafrost, hydrology and geotechnical conditions in the Aldan mining district]. Moscow: MGU; 1975. 444 p.
31. Jol H.M. (ed.) Ground penetrating radar theory and applications. Amsterdam: Elsevier; 2009. 523 p.
32. Edwards, L.S. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*. 1977;42(5):1020–1036. DOI: 10.1190/1.1440762.

Статья поступила в редакцию 17.07.2023, одобрена после рецензирования 07.09.2023, принята к публикации 10.10.2023.  
The article was submitted 17.07.2023; approved after reviewing 07.09.2023; accepted for publication 10.10.2023.

## Информация об авторах

### Нерадовский Леонид Георгиевич

Доктор технических наук,  
старший научный сотрудник лаборатории инженерной  
геокриологии  
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова  
(ИМЗ)» СО РАН  
677010 Якутск, ул. Мерзлотная, д. 36, Республика Саха (Якутия)  
e-mail: leoner@mpi.ysn.ru

## Information about authors

### Leonid G. Neradovskii

Doctor of Technical Sciences,  
Senior Researcher at the Laboratory of Engineering Geocryology  
Melnikov Permafrost Institute SB RAS  
36, Merzlotnaya Str., Yakutsk, 677010, Russia  
e-mail: leoner@mpi.ysn.ru