



**Нерадовский Л.Г.**

д.т.н., старший научный сотрудник  
лаборатории инженерной геокриологии  
ФГБУН «Институт мерзлотоведения им.  
П.И. Мельникова» СО РАН  
L031950N@ia.ru

# ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ СКАЛЬНО-ПОЛУСКАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ Г. НЕРЮНГРИ В КРИОЛИТОЗОНЕ ЮЖНОЙ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИКИ (МЕТОДА ДИСТАНЦИОННОГО ИНДУКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ)

*Рассмотрен вопрос применения одного из забытых методов индуктивной геоэлектрики в части изучения прочности оснований инженерных сооружений на территории г. Нерюнгри. Показано, что эта типовая задача инженерно-геологических изысканий решается с приемлемой для практики погрешностью нетрадиционным путём изучения процесса затухания в слое годовых теплооборотов гальванического поля высокочастотного вертикального магнитного диполя.*

**Ключевые слова:** Нерюнгри; основания инженерных сооружений; массив песчаника; прочность; метод ДИЗ; затухание; глубина; ошибка.

Современные геофизики не обращают должного внимания на методы, которые успешно применялись в прошлом веке в государственной системе недропользования. Не желая критически ознакомиться с опытом применения этих методов, геофизики считают их устаревшими и перестают применять. Одним из примеров такой негативной тенденции служит отказ от применения метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) с его заменой разными вариантами метода частотного зондирования.

В настоящей статье сделана попытка реабилитировать метод ДИЗ не технически, а информационно. Обратит внимание на ещё неизученные возможности метода ДИЗ тех специалистов, которые применяют методы геофизики. Вниманию читателей журнала предлагается познакомиться с очередным новым результатом применения метода ДИЗ в криолитозоне Южной Якутии с целью оценки прочности оснований инженерных сооружений в г. Нерюнгри по характеристике меры затухания гальванического поля высокочастотного вертикального диполя (ВВМД).

### Краткий геологический очерк

Административный центр Южно-Якутского территориально промышленного центра г. Нерюнгри расположен в 813 км на юг от г. Якутска – столицы Республики Саха (Якутия) на водоразделе нескольких рек (Чульман, В. Нерюнгри, Малый Беркакит, Амнуннакта) с высотой рельефа 636–913 м. Местоположение г. Нерюнгри показано на космическом снимке (рис. 1).

По обобщённым экспедиционным данным МГУ [13], мерзлота в Южной Якутии и в г. Нерюн-

гри имеет островное распространение. Мерзлота отличается небольшой мощностью 20-50 м и высокой среднегодовой температурой на подошве слоя годовых теплооборотов –  $(0,1 \pm 0,5)$  оС. Тепловой режим водоразделов зависит от конвективного теплопереноса. Движение воздуха, воды в коренных породах по зонам тектоники увеличивает мощность слоя годовых теплооборотов до 30-50 м. Зимой в этих зонах образуются лёд и снег.

Район г. Нерюнгри представляет часть Чульманской впадины тектонического природы, на которую наложена Нерюнгринская синклиналь с дислокациями надвигов. В среднем течении р. Чульман и на территории г. Нерюнгри эти структуры выполнены осадочными породами горкитской свиты верхней юры и холодниканской свиты раннего мела. Осадочные породы по литологии сложены песчаником с линзами конгломератов, алевролитов, аргиллитов и каменных углей. Сверху они покрыты сплошным плащом делювия-элювия с преобладанием в этом слое дресвы, гравий с супесью и реже, горным песком ярко красного или оранжевого цвета. Строение слоя делювия-элювия наследует результат совместной деятельности 2-х главных процессов: тектонического и физического выветривания, включая в последний процесс криогенный метаморфизм. Следы этой совместной, но разделённой в геологическом времени деятельности, можно увидеть в строительных котлованах, вырытых для установки ленточных фундаментов инженерных сооружений или в других местах г. Нерюнгри, где слой делювия-элювия частично или полностью вскрыт бульдозерной техникой. Одно из таких вскрытий для строительства гаражей кол-



Рис. 1 Космический снимок г. Нерюнгри (в центре), сделанный с высоты 855 м. Слева в верхнем углу – карьер угольного месторождения с обогатительной фабрикой, а правее – р. Чульман. Длина масштабной линейки 2 км

лективного пользования показано на *рис. 2*. На нём участки строительной траншеи с хорошо отсортированным щебнисто-супесчаным и песчаным материалом красновато-оранжевого цвета служат ценными визуальными индикаторами выхода на дневную поверхность границ зон тектонического дробления и трещиноватости массива песчаника. Ниже слоя делювия-элювия и слоя годовых теплооборотов в относительно сохранной части массива песчаника эти зоны сохраняют своё первобытное состояние, бывшее до начала действия процесса выветривания, а наверху полностью разрушены.

На геологическое строение и формирование криолитозоны Южной Якутии сильное влияние оказал тектонический фактор [2]. В целом, надвиговой зоне вдоль Чульманской впадины свойственно очень сложное геокриологическое строение. С одной стороны неоднородность строения по площади и глубине, а с другой стороны неустойчивая временная динамика мерзлотно-грунтовых условий со значительным различием глубины сезонного оттаивания–промерзания (порядка 3-6 м) и с возможностью неоднократного перехода мёрзлых пород в талое состояние и наоборот.

Основание инженерных сооружений г. Нерюнгри хорошо изучено в инженерно-геологическом отношении, начиная с 1973 г. Собранный за несколько десятков лет основной объём материалов изысканий хранится в архиве Южно-Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЮжЯкутТИСИЗ). К глубокому сожалению, этот ценнейший материал в настоящее время не доступен для научной работы с целью его обобщения и публикации.



**Рис. 2**

*Обнажение слоя делювия-элювия по стенке строительной канавы на южной окраине г. Нерюнгри с чередованием зон тектонического дробления и трещиноватости массива песчаника. Масштаб по стенке канавы: 1 см-0,75 м. Фото автора*

## Методика исследований

Объектом исследований был выбран массив песчаника, служащий основанием ленточных фундаментов эксплуатируемых инженерных сооружений г. Нерюнгри, а предметом исследований – 2 характеристики.

Со стороны геологии изучалась характеристика  $R_c$  – прочность на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии образцов грунтов. В геотехнике эта характеристика широко применяется в России и за рубежом. Примерами могут служить две работы. Это очень интересная и глубоко содержательная работа группы сотрудников лаборатории ОАО «Фундаментпроект» [1] и работа Х. Басарир, Л. Тутлуоглу и С. Карпуз [3].

Образцами грунтов в исследованиях методом ДИЗ служили монолиты песчаника, отобранные по неравномерной схеме из керна скважин до глубины 10–20 м.

Значения  $R_c$  были определены в лаборатории ЮжЯкутТИСИЗ по ГОСТ 21135.2–84 [5]. Однако лишь небольшая часть лабораторных данных, которую удалось собрать по 218 скважинам, была использована методом ДИЗ, более-менее равномерно покрывая площадь г. Нерюнгри. По образцам, отобранным в интервале глубины изучения массива песчаника методом ДИЗ, вычислялись средние значения  $R_c$  для сопоставления со значениями  $k$ .

Со стороны геофизики изучалась мера затухания поля ВВМД в окрестности тех скважин, где были получены лабораторные данные по прочности массива песчаника. Мерой затухания служили значения коэффициента уменьшения ( $k$ ) амплитуды наиболее информативной и помехоустойчивой вертикальной составляющей поля ВВМД ( $H_z$ ).

Что касается изучения самого процесса затухания поля ВВМД, то такой подход в постановке метода ДИЗ до сих пор не применялся и не применяется за рубежом [4] и в России [7]. Нежелание изучать энергетическое взаимодействие электромагнитного поля с геологической средой объясняется тем, что без компенсации (технической, методической) первичного поля вертикального магнитного диполя нельзя получить правильную оценку меры индуктивного отклика в нижнем полупространстве. То есть того отклика, который измеряется во вторичном поле диполя. В реальности такую оценку получить можно и без компенсации первичного поля. Доказательством служат многолетние результаты работ методом ДИЗ в криолитозоне Якутии, Забайкальского края и Амурской области [10].

Метод ДИЗ выполнялся с аппаратурой «СЭМЗ» [7]. Технология работы с этой техникой состоит в следующем. В каждой точке зондирования на геодезической треноге высотой около 1 м неподвижно устанавливалась передающая антенна (ПРД) с неизменной частотой излучения первичного поля ВВМД равной 1,125 МГц. От антенны ПРД, начиная с расстояния 5 м, с шагом 5 м удалялась приёмная антенна (ПРМ) на расстояние до 50 м с измерением микровольтметром модуля амплитуды Hz. По результатам измерений, привязанных к точкам местоположения антенны ПРД, строили графики значений Hz в зависимости от расстояния (разноса) между антеннами. Монотонно-нелинейный спад значений Hz при росте разноса идентифицировал картину закономерного затухания вторичного поля ВВМД, которая корректно аппроксимировалась степенной функцией. Её показатель присваивал-

ся значению коэффициента k, которое в свою очередь принималось за количественную оценку интегральной (усреднённой) меры затухания поля ВВМД в неоднородной и анизотропной геологической среде (массиве песчаника).

В каждом квартале г. Нерюнгри в 1-3 точках дополнительно проводились более трудоёмкие измерения значений большой, малой оси эллипса поляризации и угла наклона большой оси к дневной поверхности. Эти измерения были необходимы для определения по альбому палеток В.Ф. Лебедева и др. [9] электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости, через которые была оценена глубина изучения методом ДИЗ оснований инженерных сооружений.

Для изучения вероятностных распределений значений характеристик k, Rc и их отношений между собой применялась программа «Стадия» [8]. Прямые отношения изучались в виде графиков корреляционной связи зависимой от Rc характеристики k, а обратные отношения – в виде графиков регрессионной связи Rc от k. Эта связь физически не существует (прочность не может зависеть от затухания поля ВВМД), но именно эта связь используется в практике математической статистики для решения разных задач натуральных экспериментов. В частности, задачи оценки Rc по данным метода ДИЗ.

Следует заметить, что статистический анализ с сопоставлением характеристик любой природы переводит разрозненные единичные определения в пространство их общей связи, носящей чаще всего, смешанный стохастически-детерминированный характер. В рассматриваемом случае этот системообразующий переход позволяет не обращать внимание на требование учёта мас-

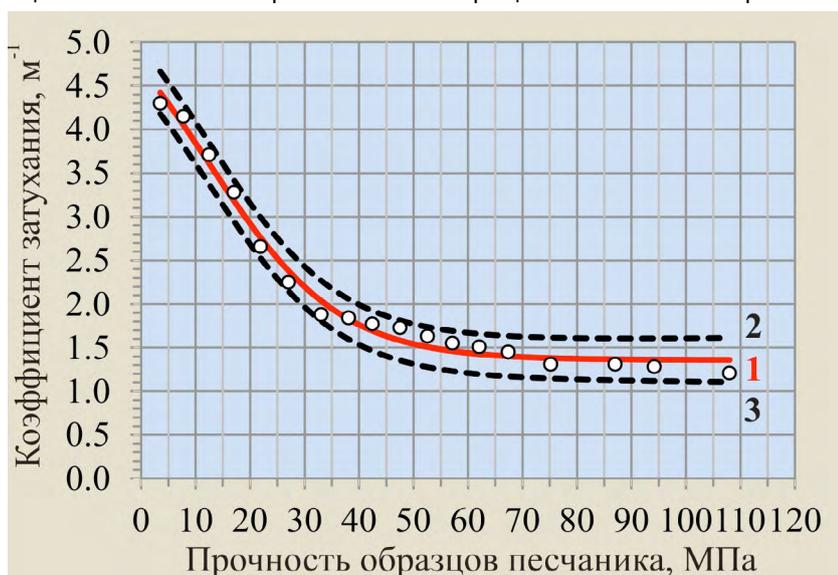
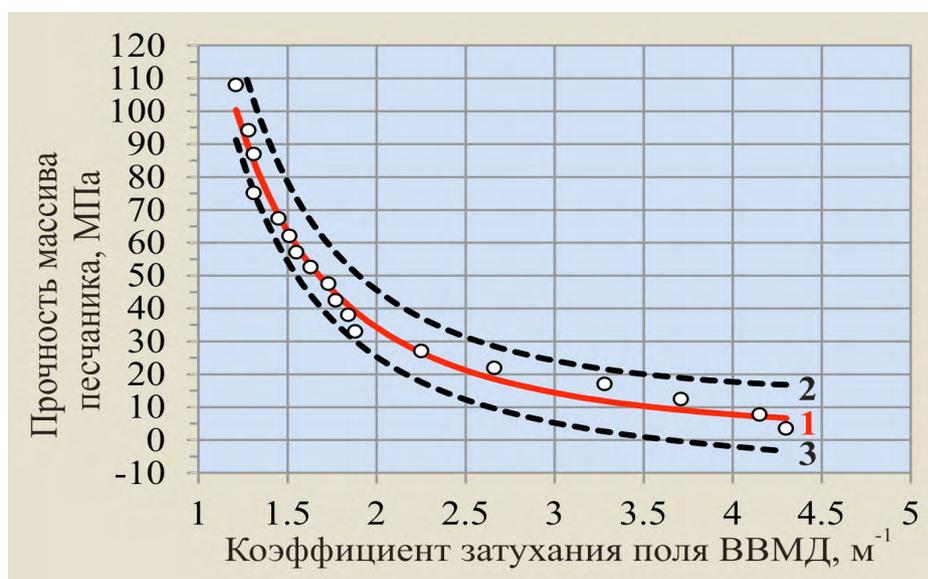


Рис. 3

График корреляционной связи волновой и прочностной характеристик: 1 – линия теоретического уравнения логистической функции; 2 и 3 – верхняя и нижняя границы 95,0 %-го доверительного интервала; 4 – фактические данные (кружки)



**Рис. 4**  
 График регрессионной связи прочностной и волновой характеристик: 1 – линия теоретического уравнения степенной функции; 2 и 3 – верхняя и нижняя границы 95,0 %-го доверительного интервала; 4 – фактические данные (кружки)

**Таблица. 1.**  
 Ошибки оценки прочности массива песчаника методом ДИЗ

Описательная статистика	МПа	%
Среднее арифметическое значение (САР)	0,10	0,09
Среднее медианное значение	0,02	0,49
Среднее модельное значение	нет	нет
Стандартное отклонение	4,16	20,30
Коэффициент вариации, %	43,28	223,10
Минимальное значение	-9,50	-62,02
Максимальное значение	7,63	35,67
Количество определений	18	18
Уровень доверительной вероятности САР (95,0 %)	2,07	10,09

штабного фактора и методом ДИЗ с привязкой к данным лаборатории оценивать прочности массива песчаника. Разумеется, полного согласия между этими данными достигнуть принципиально невозможно, как и для остальных геолого-геофизических данных. Почему? Потому, что в лаборатории изучают образцы песчаника в водонасыщенном состоянии [6], а затухание поля ВВМД изучают на застроенной территории г. Нерюнгри в массиве песчаника, находящегося в талом или высокотемпературном мёрзлом состоянии. Попутно сделаем два дополнения.

Во-первых, при необходимости оценку прочности водонасыщенного массива песчаника нетрудно получить в естественном воздушно-сухом состоянии введением поправочных нормативных коэффициентов из СНиП 2.02.01-83 [12]

применительно к инженерно-геологическим условиям г. Нерюнгри [11]. Во-вторых, средняя глубина изучения методом ДИЗ массива песчаника на частоте 1,125 МГц в интервале разносов 5-50 м с учётом эффективных значений электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости в г. Нерюнгри равен 6-18 м.

### Результат исследований

С целью снижения случайного влияния иных мерзлотно-геологических факторов кроме фактора прочности, а также промышленных помех была выполнена регуляризация исходных цифровых рядов. Для решения этой задачи ряд  $R_c$  выстраивался в порядке роста его значений. В связанном с ним ряду  $k$  происходила соответствующая перегруппировка значений. После этого ряд  $R_c$

разбивался на равные интервалы по 5 МПа. В границах этих интервалов по каждому ряду вычислялись средние арифметические значения  $R_c$  и  $k$ . Такой простой приём упорядочивания фактических данных усилил среди других факторов долю влияние фактора прочности на затухание поля ВВМД до 98,7 %. При таком очень высоком уровне детерминации статистическая парная корреляция  $k-R_c$  превращается в функциональную связь. В ней прочность становится главным фактором, однозначно регулирующим по логистическому закону изменение меры затухания поля ВВМД. Это отчётливо видно на **рис. 3**. На нём рост средней прочности лабораторных образцов песчаника приводит к нелинейному снижению таких же средних значений  $k$ . Наиболее быстрое снижение происходит на участке от 3,5 до 38,06 МПа. При таких значениях совокупность образцов песчаника классифицируется, как смешанная категория пониженной, малой и средней прочности [6]. На участке с  $R_c$  от 38,06 до 108,00 МПа (образцы песчаника, относящиеся к категории средней прочности и прочной) затухание поля ВВМД заметно замедляется. При  $R_c > 70$  МПа оно становится асимптотическим со снижением  $k$  на 35,8 %. Такое изменение выше средней ошибки определения  $k$  равной в рассматриваемом случае 7,8 %, что позволяет надёжно решать задачу оценки прочности массива песчаника при небольших значениях  $k$  – меньше 1,5 м-1.

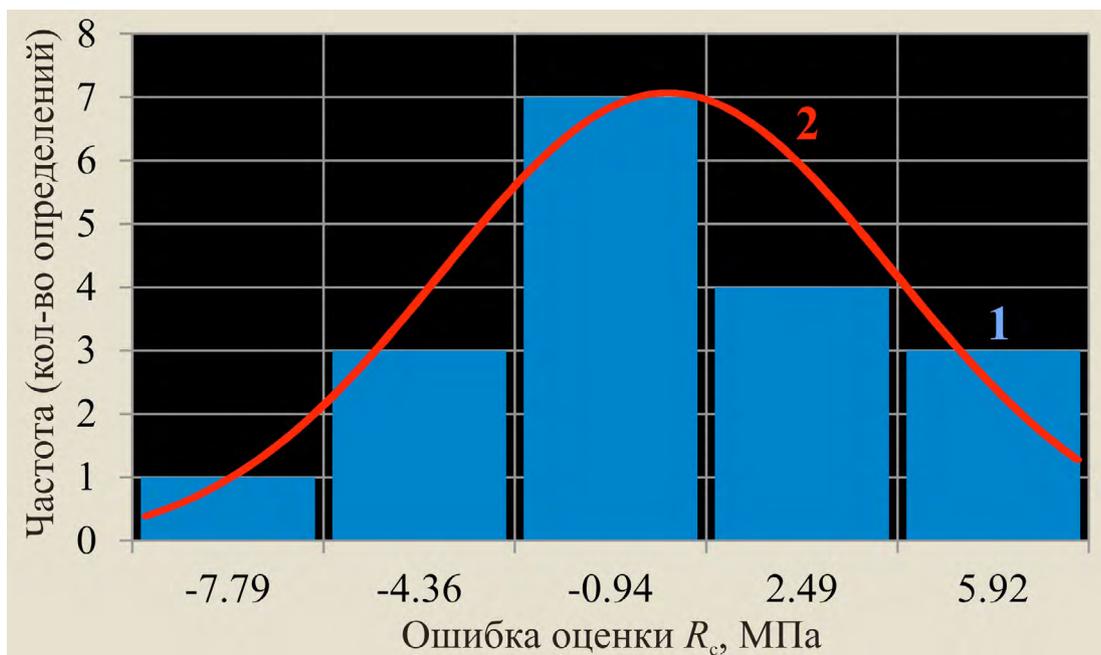
Графический образ вероятностной регуляризированной регрессионной модели (**рис. 4**)

удобен для быстрой оценки методом ДИЗ средней прочности, но уже не образцов, а массива песчаника в основании инженерных сооружений в г. Нерюнгри. Этим образом рекомендуется пользоваться в полевых условиях в ходе проведения работ методом ДИЗ. Регрессионная связь  $R_c-k$  описывается уравнением степенной функции с очень высоким приведённым значением коэффициента множественной детерминации ( $R^2=0,980$ ):

$$R_c = \exp(5,017)k^{-2,141}$$

где,  $R_c$  – среднее значение на глубине 6-18 м предела прочности массива песчаника на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии в МПа;  $k$  – среднее значение в м-1.

Среднее значение  $k$  вычисляется по группе из 5 точек ДИЗ, расположенных в углах и центре разрозненных или совмещённых участков размером до 100 м<sup>2</sup>, в пределах которых изменчивость  $R_c$  выше 5 МПа вряд ли возможна. Однако исключить возможность появления этого события нельзя. Оно может случайно возникать при нахождении точек ДИЗ в зонах разрывной тектоники на границе прочного и разрушенного песчаника или в локализованных местах техногенно-антропогенного растепления на границе мёрзлого и талого песчаника. В таких случаях неоднородность массива песчаника по строению, составу, прочностному или криогенному состоянию рекомендуется обнаруживать по результатам ДИЗ в 4-х противоположных азиму-



**Рис. 5** Вероятностное распределение абсолютных ошибок метода ДИЗ: 1 – исходная гистограмма; 2 – теоретическая вариограмма нормального закона. Объём выборки – 18 определений

тах в радиусе охвата электромагнитным полем массива песчаника равным 50-60 м.

Статистика абсолютных и относительных ошибок оценки  $R_c$  по уравнению регрессии степенной функции приведены в *таблице*. В иллюстрации вероятностных распределений ограничимся графиком абсолютных ошибок (*рис. 5*).

Табличная статистика свидетельствует, что при почти нулевых средних значениях абсолютная ошибка изменяется от  $-9,50$  до  $7,63$  МПа. Интегральная мера изменчивости по коэффициенту вариации немаленькая и равна  $43,28$  %. Доля небольших ошибок не более  $\pm(2\div 3)$  МПа составляет  $72$  %. Почти такая же доля у относительных ошибок ( $66,7$  %). Это означает, что в 7 из 10 случаев средняя прочность массива песчаника на глубине  $6-18$  м будет оцениваться методом ДИЗ с высокой точностью. При допустимой относительной ошибке определения значений  $R_c$  в  $\pm 30$  % для лабораторных данных [5] и, тем более, для данных метода ДИЗ доля таких ошибок увеличивается до  $88,8$  %.

## Заключение

Эксперимент в Южной Якутии доказал способность метода ДИЗ решать сложную задачу петрофизики мёрзлых грунтов в сложных инженерно-геологических условиях островной мерзлоты на застроенной территории в г. Нерюнгри. Изучение вероятностных отношений меры затухания в массиве песчаника гармонического поля ВВМД и прочности массива установило между этими характеристиками очень тесные корреляционные и регрессионные связи. Благодаря этому найдено уравнение степенной функции для оценки средней прочности массива песчаника по данным метода ДИЗ. Этот метод рекомендуется применять в г. Нерюнгри с целью инженерно-геологического районирования квартальной застройки по категории прочности основания инженерных сооружений, построенных в прошлом веке и эксплуатируемых более 45 лет. При таком применении относительные ошибки метода ДИЗ с вероятностью  $88,8$  % не превысят  $\pm 30$  %.

## Литература

1. Аксёнов В.И., Иоспа А.В., Кривов Д.Н., Озерский К.В., Дорошин В.В. Сопоставление результатов испытаний мёрзлых грунтов на одноосное сжатие при ступенчатой и постоянной нагрузках // Электронное научное издание «Альманах Пространство и Время. Система планета Земля». Том 11. Выпуск 1, 2016.
2. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнградской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования, 1976, вып. XV, с. 120-125.
3. Basarir H, Tutluoglu L, Karpuz C. Penetration rate prediction for diamond bit drilling by adaptive neuro-fuzzy inference system and multiple regressions // Engineering Geology, 2014, vol. 173, p. 1-9.
4. Voaga J. The use of FDEM in hydrogeophysics: A review. Journal of Applied Geophysics. 2017, vol. 139, p. 36-46.
5. ГОСТ 21135.2-84. Горные породы. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
6. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – Москва: Стандартинформ, 2020. – 38 с.
7. Иголкин В.И., Шайдунов Г.Я., Тронин О.А., Хохлов М.Ф. Методы и аппаратура электроразведки на переменном токе: научное издание. – Красноярск: Изд-во Сибирского Федерального Университета, 2016. – 272 с.
8. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М., ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006, 512 с.
9. Лебедев В.Ф., Онущенко В.И., Литвинцева Л.М. Комплекс СЭМЗ. Методическое пособие. Красноярск: Изд-во НПО Сибцветметавтоматика СССР, 1991, 83 с.
10. Нерадовский Л.Г. Технология электромагнитного зондирования мёрзлых грунтов слоя годовых теплооборотов / Под ред. А.В. Омеляненко. – Москва: АНО Изд. Дом «Научное обозрение», 2018. – 622 с.
11. Нерадовский, Л. Г. Прочность скального основания инженерных сооружений в криолитозоне Южной Якутии (г. Нерюнгри) / Л. Г. Нерадовский // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/01NZVN222.pdf> DOI: 10.15862/01NZVN222.
12. Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83) / НИИОСП им. Н.М. Герсеванова Госстроя СССР — М.: Стройиздат, 1986. – 415 с.
13. Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / под ред. В.А. Кудрявцева. – Москва: Изд-во МГУ, 1975. – 444 с.

UDC 550.379+552.513

L. G. Neradovskii, Senior Research Scientist, Laboratory of Engineering Geocryology Melnikov Permafrost Institute SB RAS, L031950N@ia.ru

## ASSESSMENT OF THE STRENGTH STATE OF THE ROCKY-SEMI-ROCKY FOUNDATION OF ENGINEERING STRUCTURES IN THE CITY OF NERYUNGRI IN THE PERMAFROST ZONE OF SOUTH YAKUTIA ACCORDING TO GEOPHYSICS DATA (REMOTE INDUCTIVE SENSING METHOD)

**Abstract:** The issue of applying one of the forgotten methods of inductive geoelectrics in terms of studying the strength of the foundations of engineering structures in the territory of the city of Neryungri is considered. It is shown that this typical task of engineering-geological surveys is solved with an error acceptable for practice by an unconventional way of studying the attenuation process in the layer of annual heat exchanges of the galvanic field of a high-frequency vertical magnetic dipole.

**Keywords:** the city of Neryungri; foundations of engineering structures; sandstone massif; strength; EMI method; attenuation; depth; error.