

СВОЙСТВА МЕРЗЛЫХ ПОРОД И ЛЬДА

УДК: 550.379+552.08
DOI: 10.15372/KZ20240402
EDN: UMYBMA

**РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА
ПРОЧНОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД ЮЖНОЙ ЯКУТИИ
МЕТОДОМ ДИСТАНЦИОННОГО ИНДУКТИВНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ****Л.Г. Нерадовский***Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия**E-mail: L031950N@ya.ru*

Рассмотрен результат ретроспективной верификации модели прогноза прочности водонасыщенных осадочных пород, слагающих в Южной Якутии основания инженерных сооружений. Модель разработана для условий г. Нерюнгри. Исходными данными для модели служила мера затухания гармонического поля вертикального магнитного диполя, определенная методом дистанционного индуктивного зондирования на частоте 1.125 МГц. Ошибки модели близки к допустимой ошибке лабораторной оценки средней прочности образцов пород, равной $\pm 20\%$. С вероятностью около 70 % ошибки модели в разных условиях строительства и эксплуатации инженерных сооружений составляют $\pm(16.8\text{--}33.5)\%$. Общая ошибка модели при принятой вероятности равна 27.2 % с максимальным разбросом единичных значений в сторону завышения лабораторной прочности слабых пород на 120.5 % или занижения прочности крепких пород на 86.8 %. Точнее всего (ошибки 22.8 и 21.9 %) задача прогноза прочности решается в условиях преимущественного распространения пород средней (15–50 МПа) и прочной (50–120 МПа) категорий. Полученная статистика доказывает региональный статус модели с практическим применением в Южной Якутии в областях распространения мерзлых высоко- и низкотемпературных осадочных пород с целью быстрого и экономичного решения задачи районирования застраиваемых территорий по категории прочности скально-полускальных грунтов.

Ключевые слова: модель города Нерюнгри, осадочные породы, массивы и лабораторные образцы пород, прочность пород в водонасыщенном состоянии, метод дистанционного индуктивного зондирования, верификация, ошибки.

Ссылка для цитирования: Нерадовский Л.Г. Результаты верификации точности модели прогноза прочности осадочных пород Южной Якутии методом дистанционного индуктивного зондирования // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 4, с. 16–26. DOI: 10.15372/KZ20240402. EDN: UMYBMA.

**VERIFICATION OF THE ACCURACY OF THE MODEL FOR PREDICTING STRENGTH
OF SEDIMENTARY ROCKS OF SOUTHERN YAKUTIA BASED
ON GEOMETRIC ELECTROMAGNETIC INDUCTION SOUNDING****L.G. Neradovskii***Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia**E-mail: L031950N@ya.ru*

This article discusses the results of retrospective verification of the strength prediction model for saturated rocks of southern Yakutia. The model was developed for the geotechnical conditions of the city of Neryungri. The input data for the model consisted of the decay rate coefficients of the harmonic field of a vertical magnetic dipole measured at a 1.125 MHz frequency using the geometric electromagnetic induction sounding method. The error of model predictions was close to the allowable error of $\pm 20\%$ for average laboratory estimates of rock sample strength and ranged from ± 16.8 to $\pm 33.5\%$ for different site conditions with a probability of about 70 %. The total error of the model at this probability is 27.2 % with maximum outliers overestimating the laboratory strength of weak rocks by 120.5 % or underestimating the strength of strong rocks by 86.8 %. The model predictions were more accurate (errors of 22.8 and 21.9 %) for the rock masses composed predominantly of moderately strong (15–50 MPa) and strong (50–120 MPa) rocks. The statistical results indicate that the model is regionally representative and can be applied in the areas of warm and cold permafrost sedimentary rocks of southern Yakutia for rapid, cost-effective terrain evaluation by rock strength.

Keywords: model for Neryungri City, sedimentary rocks, rock mass and laboratory samples, saturated rock strength, geometric electromagnetic induction sounding, verification, error.

Ушедшему в мир иной незабвенному моему учителю и наставнику доктору геолого-минералогических наук, профессору, академику РАЕН, заведующему кафедрой геофизики геологоразведочного факультета Иркутского политехнического института Г.С. Вахромееву

ВВЕДЕНИЕ

Разработке и применению геофизических моделей прогноза геологических характеристик придавалось первостепенное информационно-экономическое значение в прошлом веке и в России, и за рубежом. Основные принципы создания физико-геологических моделей (ФГМ) были заложены в 60–70-х гг. прошлого века в геологии [Вахромеев, Давыденко, 1987]. В развитие идеи, теории и методических вопросов практического применения моделей прогноза, наряду с Г.С. Вахромеевым и его учениками, внесли большой вклад многие ученые нашей страны. Среди них: Ф.М. Гольцман, В.Н. Страхов, А.Г. Тархов, В.С. Якупов, В.П. Мельников, Б.М. Седов, В.И. Джурик, А.А. Никитин, А.Д. Фролов, А.М. Епинатьева, Ю.И. Блох и др. Особо стоит отметить вклад сотрудников институтов Гидропроект им. С.Я. Жука (Москва) и НИИ Гидротехники им. Б.Г. Веденеева (Санкт-Петербург) в разработку моделей сейсмического прогноза механических свойств скально-полускальных оснований проектируемых гидротехнических сооружений на северо-востоке РСФСР, а также в азиатских и кавказских республиках СССР.

В систематизированном и обобщенном виде результаты исследований указанных институтов отражены в работах [Рекомендации..., 1981; Рекомендации..., 1985], а также в монографии [Воронков, 2009]. Есть и другие важные публикации, но они менее известны и доступны для современного читателя, например, монографии по решению прогнозных инженерно-геологических и геолого-разведочных задач сейсмоакустическими и другими методами геофизики [Савич, Яценко, 1979; Гриб, Самохин, 1999; Сясько и др., 2004].

Ранее [Нерадовский, 2022а] была рассмотрена новая ФГМ, построенная по данным метода дистанционного индуктивного зондирования (ДИЗ) для инженерно-геологических условий г. Нерюнгри. Модель создавалась путем использования классического вероятностно-статистического подхода¹ с целью прогноза средних оценок прочности массива песчаника с допущением возможности его перехода под влиянием климатических и техногенно-антропогенных факторов из мерзлого в во-

донасыщенное состояние в основании инженерных сооружений г. Нерюнгри (для краткости назовем эту модель моделью города Нерюнгри).

В отличие от сейсмических моделей, давно ставших стандартными для решения типовых задач геомеханики, в модели г. Нерюнгри применяется иная петрофизическая основа. Вместо скоростей распространения продольных и поперечных волн изучается мера затухания установившегося гармонического высокочастотного эллиптически поляризованного поля вертикального магнитного диполя (далее – поле ВВМД) в слое годовых теплооборотов.

Цель настоящей работы – доказать или опровергнуть гипотезу о региональном статусе модели г. Нерюнгри с возможностью ее применения за пределами этого города в иных инженерно-геологических условиях. Цель была достигнута обобщением результатов верификации модели на пяти участках в областях распространения мерзлых толщ осадочных пород в криолитозоне Южной Якутии.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ОШИБОК МОДЕЛИ

Существует два метода верификации – внутренний и внешний. Результат внутренней верификации зависит от того фактического материала, на котором построена модель. Поэтому в случаях сочетания благоприятных или неблагоприятных условий можно принять ложное решение о положительной или отрицательной верификации модели. При возможности подтвердить или опровергнуть результаты эксперимента дополнительным заверочным либо контрольным бурением скважин и проходкой шурфов применяется метод внешней верификации за границами построения моделей с иными условиями получения фактического материала.

Общим для всех участков верификации модели г. Нерюнгри являлось применение инженерно-геологических элементов (ИГЭ)². Методику применения ИГЭ с целью решения задачи классификации геологических тел предложили Н.В. Коломенский и И.С. Комаров [Коломенский, 1956]. Благодаря знанию ИГЭ удалось корректно срав-

¹ С применением методов корреляционно-регрессионного анализа.

² ИГЭ представляют собой результат кропотливой интеллектуальной работы инженеров-геологов. Теоретически подход с использованием ИГЭ базируется на сложном для понимания методе распознавания образов [Ватник, Червоненкис, 1974], который во множестве практических вариантов широко применяется во всех областях геофизики при решении задач классификации, например, с использованием нейронных сетей, т. е. принципов искусственного интеллекта.

нить точечные лабораторные оценки прочности образцов пород с объемными оценками прочности массива пород, полученными по данным метода ДИЗ. В решении задачи масштабирования точечные оценки прочности образцов пород отчасти приобретали свойства объемности в силу классификации по комплексу нормативных (средних) показателей³ состава, состояния и свойств массивов осадочных пород.

Фактический материал верификации модели г. Нерюнгри представлял собой единообразную по содержанию и сопоставимую по глубине изучения толщи осадочных пород совокупность лабораторных данных и метода ДИЗ. Лабораторные данные состояли из средних значений R_c – временного предела прочности на одноосное сжатие в водонасыщенном состоянии образцов осадочных пород [ГОСТ 21135.2-84, 1984]. Образцы приготавливались из монолитов пород, отобранных из керна скважин на разной глубине [Левкович, 1989].

Данные метода ДИЗ получены в окрестности скважин с применением аппаратуры СЭМЗ [Комплекс..., 1991]. Методика измерений при помощи аппаратуры СЭМЗ и математическая обработка результатов измерений описаны в работе [Нерадовский, 2022а]. Изучение прочности осадочных пород выполнено на частоте 1.125 МГц в полосе разноса⁴ от 5–10 до 30–100 м. При такой частоте и эффективных значениях электрофизических характеристик⁵, оцененных по палеткам В.Ф. Лебедева [Лебедев и др., 1991], регулировка разноса приемно-передающих антенн обеспечивала сопоставимую с буровыми работами глубину⁶ изучения прочности пород.

За исключением первого участка верификации, на остальных участках исходными данными для модифицированной версии модели г. Нерюнгри [Нерадовский, 2022б] служили групповые значения коэффициента k , которые определялись в окрестности скважин в 2–4 азимутах. Значения k корректно идентифицировали меру затухания поля ВВМД в переходной зоне приведенного расстояния⁷ по снижению значений вертикальной составляющей поля ВВМД в зависимости от разноса приемно-передающих антенн. Монотонно-нелинейный процесс снижения этой составляющей

поля ВВМД в применении к исследуемым мерзлым толщам неоднородных и анизотропных осадочных пород корректно описывался степенной функцией. Значения коэффициента k приравнивались к показателю степенной функции. Эти значения автоматически определялись при аппроксимации степенной функцией графиков модуля амплитуд вертикальной составляющей поля ВВМД, построенных в зависимости от разноса приемно-передающих антенн.

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

В настоящей статье рассмотрены особенности участков верификации модели г. Нерюнгри, помогающие читателю понять ту природную обстановку, в которой анализировались ошибки модели.

Первый участок верификации

Результаты внутренней верификации модели г. Нерюнгри опубликованы в [Нерадовский, 2022а,б, 2023в]. Участок расположен в центральной части г. Нерюнгри, где в конце 1980-х гг. было пробурено 218 скважин до глубины 10–15 м. Опробование на прочность массива осадочных пород буровыми скважинами с последующей лабораторной оценкой по монолитам пород средних значений R_c сделано на глубине 7–17 м. По данным ДИЗ, глубина изучения прочности пород составляла 6–18 м.

Согласно данным ООО “Нерюнгростройизыскания” и обобщению результатов региональных исследований [Южная Якутия..., 1975; Желинский и др., 1976; Желинский, 1980; Гриб, Самохин, 1999], доминирующим литотипом в толще мезозойских углевмещающих осадочных пород в г. Нерюнгри и Южной Якутии являлся песчаник. Кроме того, есть еще одна черта, присущая криолитозоне Южной Якутии, – это неоднородность и высокая изменчивость прочности песчаника, разуплотненного процессами тектоники с образованием сложнейшей системы дробления и трещиноватости [Мокшанцев и др., 1964; Булдович и др., 1976]. На эти процессы наложился процесс криогенеза [Шестернев, 2001], в результате чего в Южной Якутии образовалась прерывисто-островная криолитозона. Строение, мощность и температура

³ Эти показатели объединяют и упорядочивают разрозненные и изменчивые по глубине и площади единичные значения геологических характеристик в групповые наиболее вероятностные значения с заданной надежностью их определения в лабораторных условиях.

⁴ Расстояние между антенной, излучающей первичное поле ВВМД, и антенной, принимающей суммарное первичное и вторичное поле, образовавшееся в массиве осадочных пород.

⁵ Электрическое сопротивление и действительная часть комплексной относительной диэлектрической проницаемости. Эти характеристики оценивались по результатам измерений составляющих эллиптически поляризованного поля ВВМД не во всех, а лишь в некоторых точках ДИЗ, равномерно распределенных по разряженной сети наблюдений на площади участков верификации.

⁶ Оценка эффективной глубины проникновения эллиптически поляризованного поля ВВМД в массив осадочных пород осуществлялась по графику, заимствованному из работы В.С. Титлинова и Р.Б. Журавлевой [1995].

⁷ Произведение разноса приемно-передающих антенн на модуль комплексного волнового числа.

криолитозоны регулируются климатом, ландшафтом и геоморфологией местности [Южная Якутия..., 1975], а также внутриземными тепловыми потоками [Железняк, 2015]. Мощность мерзлоты на водораздельных пространствах Южной Якутии составляет 20–50 м. Среднегодовая температура на глубине 10–20 м близка к 0 °С. В г. Нерюнгри, по данным термометрии изыскательских скважин, на участках деградации мерзлоты⁸ с появлением талых песчаников температура на глубине 10 м изменялась от 0 до 6.5 °С. В местах сохранения мерзлоты ее мощность была равна 13–18 м, а среднегодовая температура на глубине 10 м изменялась от –0.1 до –0.4 °С.

Идентичность по комплексу природных условий территории г. Нерюнгри и Южной Якутии в областях распространения углеводородных осадочных пород весьма важна. Она дает основание рассматривать территорию г. Нерюнгри как ключевой участок для включения его в государственную сеть долговременного геоэкологического и геотехнического мониторинга [Мельников и др., 2022].

Второй участок верификации

В отличие от первого участка внутренняя верификация модели г. Нерюнгри сделана более сложным путем – в одном из жилых кварталов с названием “М” [Нерадовский, 2023б; Нерадовский, Осьмушкин, 2023]. По комплексу благоприятных и неблагоприятных условий эксплуатации инженерных сооружений квартал “М” мало чем отличается от аналогичных условий в других кварталах города. Сложность решения задачи верификации в квартале “М” заключалась в сравнении геолого-геофизических средних значений R_c , определенных с очень большим разрывом во времени в 53 скважинах, пробуренных по периметру инженерных сооружений. Лабораторные средние значения R_c были получены в 1984–1985 гг. по монолитам песчаника, взятым чаще всего на глубине 5–10 м. Геофизические прогнозные оценки средних значений R_c водонасыщенного массива песчаника были определены по модифицированной версии модели г. Нерюнгри в 2017–2018 гг. на глубине от 5–7 до 14 м.

Что касается самой задачи верификации, то она корректно решалась путем устранения систематической разницы между лабораторными и геофизическими рядами значений прочности. Эта простая операция выполнялась несколько раз до наступления стадии равновероятного локального отклонения в сторону роста или снижения еди-

ничных геофизических значений прочности по отношению к лабораторным значениям.

Третий участок верификации

На третьем участке сделана внешняя верификация модели г. Нерюнгри [Нерадовский, 2023в]. Участок расположен на севере Южной Якутии в 421 км от г. Нерюнгри на границе со сплошной криолитозоной Центральной Якутии, по трассе АЯМ между станцией Амга и разъездом Болотный. Протяженность участка 52 км. Участок расположен на правом, покрытом курумами, пологом склоне долины р. Модут. Присутствие курумов осложняло, но не препятствовало работе методом ДИЗ. Возможность работы на курумах делает метод ДИЗ незаменимым⁹ при изучении прочности осадочных пород по вероятностным моделям прогноза и, в частности, по модели г. Нерюнгри.

Буровые и геофизические работы были выполнены в 1993–1995 гг. не по всему участку, а избирательно в местах, где намечалось строительство выемок, водопропускных труб, мостовых переходов и т. п. Общая длина участка для решения задачи верификации модели г. Нерюнгри составила 4.3 км.

По данным АО “Мосгипротранс”¹⁰, скально-полускальным основанием инженерных сооружений на третьем участке верификации модели г. Нерюнгри служил мерзлый массив доломита с низкой температурой. Массив залегает под мощным слоем делювия–элювия и находится в сильнотрещиноватом состоянии с повсеместным заполнением трещин глинистым материалом. Мощность и состав делювия–элювия, а также прочность массива доломита сильно изменялись по оси трассы АЯМ. При среднем значении 8.0 м мощность слоя делювия–элювия изменялась от 2.1 до 23.4 м. Однако в большинстве случаев (72 %) мощность делювия–элювия не превышала 10 м.

По данным термометрии скважин, среднегодовая температура массива доломита на глубине 10–15 м изменялась от –0.8 до –4.8 °С при среднем значении –3.4 °С.

Четвертый участок верификации

На четвертом участке проверка модели г. Нерюнгри сделана в 1990–1991 гг. на станции Кюр-геллях [Нерадовский, 2023а]. По данным бурения 25 скважин, до глубины 10–15 м грунтовое основание станции сложено нижнекембрийскими карбонатными породами олёкминской свиты в виде переслаивания доломитов с известняками. Сверху породы покрыты слоем четвертичных и древних

⁸ На участках строительства с уничтожением почвенно-растительного покрова.

⁹ В сравнении с методами электротомографии, переходных процессов и георадиолокации.

¹⁰ Пробурено 57 скважин, но верификация модели г. Нерюнгри сделана по 37 скважинам, в которых глубина залегания массива доломита не превышала 10 м.

делювиально-элювиальных отложений. Отложения четвертичного возраста имеют мощность 0.4–2.1 м. Они распространены повсеместно и сложены суглинком с включением дресвы и гравия осадочных пород. Древние отложения кайнозойского или палеозойского возраста состоят из ярко-красных, желтых глин и распространены в границах тектонических зон дробления и трещиноватости массива осадочных пород. Чаще всего мощность слоя глин составляет 1.6–2.8 м. Однако в примыкании к тектоническим зонам и в самих зонах мощность увеличивается до 4.5–8.6 м и более, как в точках двух скважин, где глины древней коры выветривания распространяются до глубин 24.6 и 17.4 м. Опробование на прочность осадочных пород выполнено при буровых работах в интервале глубин 0.8–11 м. Наиболее часто монолиты отбились из керна скважин на глубине 6–11 м. Методом ДИЗ прочность пород в целом изучена в интервале глубин 6–12 м.

Пятый участок верификации

На пятом участке завершена проверка модели г. Нерюнгри [Нерадовский, 2023г]. Участок расположен на железнодорожной станции АЯМ “Олень” в 682 км на север от г. Нерюнгри. Площадка станции расположена на Лено-Алданском плато на склоне долины ручья Ойос-Ордох, правого притока р. Лютенга.

Абсолютные отметки рельефа в месте расположения станции изменяются от 320 до 340 м.

Методами ДИЗ и дискретной георадиолокации работы выполнены на станции летом 1989 г. Бурение скважин и проходка шурфов произведены весной 1990 г. с учетом данных геофизики. Пять из 15 скважин вскрывали кровлю осадочных пород на глубину 3–5 м.

По данным В.М. Калинина, В.С. Якупова [1989] и М.Н. Железняк [2015], в районе станции “Олень” криолитозона имеет сплошное распространение до глубины 200–300 м. По данным термометрии скважин, температура мерзлых осадочных пород на глубине 10–15 м изменялась от –1.3 до –2.3 °С при среднем значении –1.7 °С.

Основание инженерных сооружений сложено нижнекембрийскими карбонатными породами в виде переслаивания известняков и доломитов, залегающих на глубине 12–19 м. Сверху осадочные

породы покрыты мерзлыми четвертичными отложениями смешанного генезиса: аллювиального, озерно-болотного и делювиально-элювиального. Сверху до глубины 3–5 м состав отложений глинистый с чередованием глин, суглинков и супесей. Пески с линзами гравийных грунтов встречаются внизу на границе с осадочными породами. Мощность четвертичных отложений закономерно увеличивается вниз по склону долины руч. Ойос-Ордох.

Опробование на прочность массива осадочных пород выполнено при буровых работах на глубине 14–18 м. Методом ДИЗ прочность массива пород изучена до глубины 10–19 м.

ИТОГОВЫЙ РЕЗУЛЬТАТ ВЕРИФИКАЦИИ

Фактическим материалом результатов верификации служили ошибки модели г. Нерюнгри, характеризующие ее точность в прогнозной оценке средней прочности водонасыщенного массива песчаника относительно лабораторных данных. За эталон сравнения принят ГОСТ 21135.2-84 [1984]. По его требованиям при проведении массовых лабораторных опытов ошибки определения средних значений R_c по шести образцам с надежностью 80 % не должны превышать ± 20 %. Что касается вероятностно-статистического анализа ошибок модели г. Нерюнгри, то он сделан с помощью программы “Стадия” [Кулаичев, 2006].

Вначале рассмотрим кратко, в порядке констатации, частные ошибки модели г. Нерюнгри по каждому из пяти участков верификации, а затем результаты детального анализа общей ошибки по всем участкам. В дополнение приведем результат анализа зависимости ошибок модели от прочности осадочных пород, полученных в лаборатории.

Приведенные в табл. 1 частные ошибки представляют собой разброс единичных значений, оцененный по значению стандартного отклонения. Эта статистика, как известно, соответствует доверительной вероятности принятия вероятностно-статистических решений, равной 68.2 %. Из табл. 1 следует, что наилучшим образом точность модели проверена в г. Нерюнгри, где основания инженерных сооружений сложены мерзлым высокотемпературным песчаником. Здесь разброс ошибок не превысил ± 30 %. При проверке точности модели за пределами г. Нерюнгри, где распространены

Таблица 1. Сводка частных ошибок модели г. Нерюнгри

Номер	Название участка	Тип верификации	Осадочные породы	Количество скважин	Ошибка модели, %
1	Город Нерюнгри	Внутренняя	Песчаник	218	± 27.8
2	Квартал “М” г. Нерюнгри	Внутренняя	Песчаник	53	± 30.1
3	Станция Амга–разъезд Болотный	Внешняя	Доломит	37	± 16.8
4	Станция “Кюргеллях”	Внешняя	Доломит, известняк	25	± 22.0
5	Станция “Олень”	Внешняя	Доломит, известняк	5	± 33.6

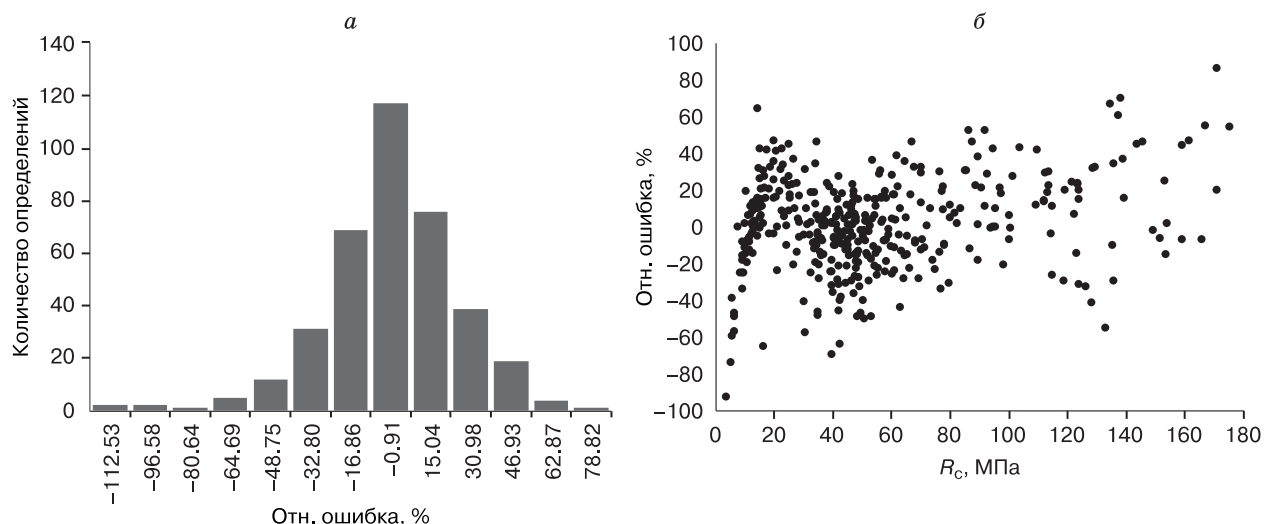


Рис. 1. Сводная гистограмма ошибок модели г. Нерюнгри (а) и поле рассеяния ошибок в зависимости от прочности (R_c) водонасыщенных образцов осадочных пород (б).

Объем выборки – 393 определения.

мерзлые массивы доломитов и известняков с разной температурой, разброс ошибок не превысил $\pm 35\%$. При близких частных ошибках общая средняя медианная ошибка модели в разнообразных инженерно-геологических условиях ее проверки составляет $\pm 27.8\%$.

Оценим общую ошибку модели г. Нерюнгри в отношении вероятностного распределения значений ошибок во всей совокупности фактического материала (рис. 1, а). Сводная гистограмма этого распределения свидетельствует о равновероятном разбросе в ту или иную сторону¹¹ ошибок возле почти нулевого значения. Тестовая проверка по трем критериям (Колмогорова, омега-квадрат и хи-квадрат) опровергает нулевую гипотезу о соответствии распределения ошибок закону Гаусса¹². Однако если из ряда ошибок убрать три незначительные по числу определений¹³ группы аномальных ошибок, то при повторной тестовой проверке нулевая гипотеза подтверждается по всем критериям. В этом случае по среднеарифметической нулевой ошибке можно узнать теоретическую оценку того математического ожидания, которое соответствует неизвестному истинному значению средней ошибки. Речь идет об ошибке, которая оценивается по генеральной совокупности данных, состоящих из бесконечного числа определений. В рассматриваемом случае эта ошибка при доверительной вероятности 95 % находится в

интервале $\pm 2.37\%$. Это означает, что в местах распространения толщ осадочных пород определяемая по модели г. Нерюнгри средняя прочность пород по общей совокупности данных метода ДИЗ в целом, по району работ или по отдельным участкам изысканий практически не будет отличаться от лабораторных данных. Сделанный вывод обречет научную значимость при проведении региональных исследований с применением известной методики ключевых участков¹⁴, а также в тех случаях, когда цель научного поиска сосредоточена на разработке ФГМ освоенных и осваиваемых районов криолитозоны Южной Якутии.

Что касается единичных ошибок модели г. Нерюнгри, то они варьируют в широком диапазоне от -120.53 до 86.79% . Несмотря на это, в 76.3 % случаев ширина их разброса не более $\pm 30\%$. Детальный анализ отсортированного ряда ошибок показывает следующее. Доля ошибок модели, равных лабораторным ошибкам ($\pm 20\%$) или близких к ним ($\pm 25\%$), составляет 59.8 и 68.9 % соответственно. Если руководствоваться применением статистики одного стандартного отклонения, то с вероятностью около 70 % разброс ошибок будет составлять $\pm 27.22\%$ (табл. 2). При любом подходе к анализу ошибок следует ожидать, что в 7 из 10 случаев ошибки модели г. Нерюнгри будут отличаться от лабораторной ошибки на 22.2–27.6 %, т. е. не более чем на 30 %.

¹¹ В сторону завышения (ошибка со знаком минус) или занижения (ошибка со знаком плюс) лабораторной прочности.

¹² Так называется закон в теории ошибок. В общей математической статистике этот фундаментальный закон называется нормальным законом, или законом больших чисел.

¹³ Их доля в общей совокупности фактического материала составляет 5.85 %.

¹⁴ Методика предложена выдающимся ученым В.А. Кудрявцевым.

Таблица 2. Прочность водонасыщенных образцов осадочных пород криолитозоны Южной Якутии по лабораторным данным

Статистика	Прочность осадочных пород R_c , МПа				
	1	2	3	4	1–4
Среднее арифметическое	10.20	35.00	73.54	141.81	54.95
Медианное среднее	11.01	36.81	67.43	137.60	46.74
Модальное среднее	6.30	15.20	56.70	123.60	6.30
Стандартное отклонение	3.37	10.55	19.65	16.37	37.90
Коэффициент вариации, %	33.00	30.10	26.70	11.90	69.00
Минимум	2.50	15.01	50.17	121.40	2.50
Максимум	14.78	49.65	119.30	175.20	175.20
Количество определений	47	176	134	36	393

Примечание к табл. 2, 3: 1 – осадочные породы малой, пониженной и низкой категории прочности с $R_c < 15$ МПа; 2 – средняя категория прочности пород с $R_c = 15–50$ МПа; 3 – породы прочной категории с $R_c = 50–120$ МПа; 4 – породы очень прочной категории с $R_c > 120$ МПа; 1–4 – прочность по всем категориям.

В завершение анализа ошибок модели г. Нерюнгри рассмотрим вопрос, касающийся зависимости ошибок от прочности образцов осадочных пород, определенных в лабораторных условиях. Решим эту задачу, группируя ошибки по категориям прочности водонасыщенных¹⁵ скально-полускальных грунтов [ГОСТ 25100-2020, 2020]. Иллюстрация изменчивости единичных ошибок показывает их сложную зависимость от прочности образцов пород (см. рис. 1, б). И это неудивительно, принимая во внимание динамичные природные условия, присущие сложно построенной криолитозоне Южной Якутии. Вызывает удивление реакция массивов осадочных пород на их высокочастотное индуктивное возбуждение, выражаемая в разных тенденциях изменчивости ошибок. Таких тенденций три.

Первая тенденция проявляется в виде начального линейного участка графика ошибок (см. рис. 1, б) со знаком минус, что означает систематическое завышение прочности образцов пород по модели г. Нерюнгри. Завышение невелико и в среднем составляет 7.69 %. При этом в единичных случаях оно может достигать более 100 %. Такая особенность наблюдается в местах распространения пород малой прочности (<15 МПа), пониженной и низкой прочности (3–5 и 1–3 МПа). Доля таких пород, неблагоприятных для строительства и эксплуатации инженерных сооружений, равна 12 %.

Вторая тенденция с равновероятным завышением/занижением по модели г. Нерюнгри прочности образцов пород охватывает наиболее многочисленные скальные массивы средней (15–50 МПа) и прочной (50–120 МПа) категорий. Суммарная доля таких массивов, благоприятных для строительства и эксплуатации инженерных сооружений, составляет 78.9 %.

Третья тенденция менее заметно проявляет себя в конце графика ошибок (см. рис. 1, б) с занижением прочности образцов пород до 60 % и более. Действует тенденция в местах распространения плотных монолитных массивов скальных пород очень прочной категории со значениями $R_c > 120$ МПа. Доля таких пород минимальна и составляет 9.2 %.

В обобщенном виде динамика единичных ошибок и их тенденции в зависимости от категорий прочности искусственно водонасыщенных лабораторных образцов осадочных пород приведены на рис. 2. Категориальная статистика прочности



Рис. 2. Обобщенная долевая динамика ошибок модели г. Нерюнгри в зависимости от инженерно-геологических категорий прочности водонасыщенных образцов осадочных пород.

Жирная линия – допустимый по [ГОСТ 21135.2-84, 1984] уровень ошибок, равный ± 20 % при условии проведения массовых лабораторных определений прочности образцов скально-полускальных грунтов. Цифры в кружках – разброс ошибок модели г. Нерюнгри со стандартной доверительной вероятностью 68.2 %, цифры возле кружков – доля ошибок в общем количестве определений.

¹⁵ Для воздушно-сухого состояния такие категории в [ГОСТ 25100-2020, 2020] не предусмотрены.

Таблица 3. Ошибки модели г. Нерюнгри по категориям прочности осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии

Статистика	Ошибки модели, %				
	1	2	3	4	1–4
Среднее арифметическое	–17.15	–0.63	3.87	17.95	0.45
Медианное среднее	–7.69	1.38	3.80	21.98	1.91
Модальное среднее	Нет	15.60	–15.60	Нет	3.5
Стандартное отклонение	±37.12	±22.85	±21.86	±33.92	±27.22
Минимум	–120.50	–69.12	–49.50	–55.08	–120.50
Максимум	64.33	47.00	52.80	86.80	86.79
Количество определений	47	176	134	36	393

образцов пород и ошибки их по модели г. Нерюнгри представлены в табл. 2, 3.

При упорядочивании и с учетом табличной статистики становится ясно, что разница между точечными и объемными лабораторными и геофизическими оценками прочности осадочных пород в изученных частях криолитозоны Южной Якутии далека от той критической черты, за которой нельзя доверять модели г. Нерюнгри.

При изучении наиболее распространенных осадочных пород категории средней прочности и прочной категории со средними значениями R_c , равными 15.20–36.81 и 56.70–73.54 МПа, равновероятный разброс ошибок по второй тенденции не превышает 23 %. Доля таких небольших ошибок в общем числе определений составляет 78.9 %. В редко встречаемых категориях слабых и очень прочных осадочных пород со средними значениями R_c , равными 6.30–11.01 и 123.60–141.81 МПа, равновероятный разброс ошибок модели г. Нерюнгри в границах действия первой и третьей тенденций после устранения из них систематического знакопеременного фона составляет ±37.12 и ±33.92 %. Совокупная доля таких повышенных ошибок равна 21.1 %.

Причина завышения и занижения по модели г. Нерюнгри прочности массивов осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии по отношению к лабораторной прочности образцов пород в таком же состоянии заключается в совместном действии масштабного и петрофизического факторов. Первый фактор имеет общее значение и оценивает прочность пород в разных масштабах. С геологической точки зрения, это точечные оценки, а с геофизической – объемные оценки. Фактор масштаба действует всегда, но особенно усиливается в экстремальных природных условиях, в рассматриваемом случае – в условиях распространения слабых и крепких осадочных пород. Второй фактор индивидуален и обусловлен петрофизическими и вероятностно-

статистическими (корреляционными, регрессионными) особенностями модели г. Нерюнгри. Они состоят в нелинейной зависимости меры затухания поля ВВМД от прочности массивов пород [Нерадовский, 2022a]. В местах распространения слабых пород с прочностью ниже 15 МПа и крепких пород с прочностью выше 120 МПа мера затухания суммарного первичного и вторичного поля ВВМД асимптотически приближается к неизменным значениям коэффициента k . Это означает, что эффект индукции, порождающий затухание поля ВВМД, становится настолько слабым, что практически теряет способность реагировать на тонкие изменения прочности массива осадочных пород. В слабых породах типа “рухляка” этому мешает избыток глинистого материала, который находится в промежутках между сохранившимися от полного разрушения консолидированными остатками блочно-ячеистой структуры. В крепких породах, напротив, недостает глинистого материала, присутствующего фрагментарно в трещинно-жильной структуре.

В результате совместного действия указанных факторов возникает информационная неопределенность (или двойственность) принятия решений об истинной прочности слабых и крепких пород между данными изысканий и метода ДИЗ. В случаях, когда скважины¹⁶ вскрывают слабые породы, опробование их прочности выполняется без учета разьединенных консолидированных останцов пород. Однако в окрестности таких скважин в радиусе от 5 до 50–100 м модель г. Нерюнгри учитывает совокупное влияние останцов пород, попавших в том или ином количестве в сферу воздействия поля ВВМД, что приводит к завышению оценок прочности пород в среднем на –7.69 % (см. табл. 3). При случайном попадании скважин на крепкие породы опробование их прочности делается без объемного учета глинистого материала. Модель г. Нерюнгри учитывает влияние всего глинистого материала, рассеянного по тонким тре-

¹⁶ Местоположение скважин задается проектировщиками по градостроительным правилам без предварительного знания геологического строения участков инженерно-строительных изысканий, т. е. случайно.

щинам волосяного типа. В результате чего оценки прочности занижаются на 21.98 % (см. табл. 3), т. е. почти в 3 раза сильнее, чем в случае завышения прочности.

Итак, по результатам верификации модели г. Нерюнгри ее ошибки в части прогноза оценок средней прочности массивов мерзлых осадочных пород в водонасыщенном состоянии близки к допустимым по [ГОСТ 21135.2-84, 1984] ошибкам лабораторных оценок средней прочности образцов скально-полускальных грунтов, искусственно водонасыщенных. По статистике в большинстве случаев, т. е. с надежностью решения задачи прогноза около 70 %, ошибки модели несколько превышают ± 30 %. При такой точности модель г. Нерюнгри рекомендуется применять на всех стадиях инженерно-геологических изысканий в областях распространения мерзлых толщ осадочных пород с целью районирования застраиваемых территорий Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ошибки вероятностной оценки средней прочности массивов осадочных пород в прогнозируемом водонасыщенном состоянии, изученные на пяти участках верификации модели г. Нерюнгри, изменяются от ± 16.8 до ± 33.6 % в зависимости от литотипа осадочных пород и от ± 21.9 до ± 37.1 % в зависимости от инженерно-геологической категории прочности пород. В целом средние показатели ошибок с вероятностью около 70 % равны ± 27.2 и ± 30.1 % и близки к предельно допустимой по [ГОСТ 21135.2-84, 1984] лабораторной ошибке ± 20 % в определении средней прочности образцов скально-полускальных водонасыщенных грунтов. Тем самым удостоверяется положительный итог репрезентативной верификации модели по следующим инженерно-геологическим условиям строительства и эксплуатации инженерных сооружений в освоенных районах криолитозоны Южной Якутии:

- 1) местоположению – прерывисто-островная криолитозона Южной Якутии и частично сплошная на границе с южной частью Центральной Якутии;
- 2) расстоянию между участками верификации – сотни километров;
- 3) рельефу – высоте рельефа местности 320–868 м;
- 4) количеству проектно-изыскательских скважин – 338;
- 5) глубине опробования осадочных пород на прочность от 3–6 до 10–15 м;
- 6) температуре мерзлых осадочных пород в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10–15 м – от $-0.1...-0.5$ до $-1.0...-4.0$ °С;

7) литотипу осадочных пород – песчаник, доломит, известняк;

8) глубине залегания осадочных пород – от 2–3 до 6–8 м и более;

9) генезису и типу покровных образований – четвертичный делювий–элювий, глинистый элювий древней коры выветривания, четвертичные дисперсные песчано-глинистые аллювиальные и озерно-болотные осадки;

10) разновидности осадочных пород (скально-полускальный) и широте изменчивости их прочности грунтов по всем группам (от низкой до очень прочной).

Перечисленных условий достаточно для доказательства гипотезы о региональном статусе модели г. Нерюнгри с возможностью ее применения в областях распространения мерзлых разнотемпературных толщ осадочных пород на всех стадиях проектно-изыскательских работ с целью решения одной из главных задач геомеханики в части районирования освоенных и осваиваемых территорий криолитозоны Южной Якутии по категории прочности скально-полускальных грунтов.

Благодарности. Исследование выполнено в лаборатории инженерной геокриологии ИМЗ СО РАН по госбюджетному финансированию (этап НИР 2023 г.) по программе СО РАН “Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов” (АААА-А20-120111690011-9).

Литература

- 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) // Мерзлот. исслед., 1976, вып. XV, с. 120–125.
- Вапник В.Н. Метод распознавания образов / В.Н. Вапник, А.Я. Червоненкис. М., Наука, 1974, 416 с.
- Вахромеев Г.С. Моделирование в разведочной геофизике / Г.С. Вахромеев, Ю.А. Давыденко. М., Недра, 1987, 192 с.
- Воронков О.К. Инженерная сейсмика в криолитозоне (изучение строения и свойств мерзлых и талых горных пород и массивов). СПб., ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2009, 401 с.
- ГОСТ 21135.2-84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М., Изд-во стандартов, 1984, 7 с.
- ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. М., Стандартинформ, 2020, 38 с.
- Гриб Н.Н. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна / Н.Н. Гриб, А.В. Самохин. Новосибирск, Наука, 1999, 240 с.
- Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск, Наука, 2015, 227 с.
- Желинский В.М. Мезозойские отложения и генетические типы угольных пластов Южной Якутии / В.М. Желинский,

В.Н. Коробицына, С.С. Каримова. Новосибирск, Наука, 1976, 126 с.

Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии. Новосибирск, Наука, 1980, 119 с.

Калинин В.М. Региональные закономерности поведения мощности мерзлых толщ / В.М. Калинин, В.С. Якупов. Якутск, ЯНЦ СО АН СССР, 1989, 144 с.

Коломенский Н.В. Инженерная геология. М., Гостеолтехиздат, 1956, т. 2, ч. 2, 320 с.

Комплекс среднечастотной аппаратуры электромагнитного зондирования (СЭМЗ). Техн. описание. Красноярск, НПО Сибцветметавтоматика СССР, 1991, 30 с.

Куланчев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М., ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006, 512 с.

Лебедев В.Ф. Комплекс СЭМЗ. Метод. пособие / В.Ф. Лебедев, В.И. Онущенко, Л.М. Литвинцева. Красноярск, НПО Сибцветметавтоматика СССР, 1991, 83 с.

Левкович А.И. Методика обоснования состава и объемов инженерно-геологических изысканий для строительства различных типов зданий и сооружений промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения в районах распространения вечномерзлых грунтов с учетом требований проектирования. М., Госстрой РСФСР, НПО Стройизыскания, 1989, 173 с.

Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Развитие геокриологического мониторинга природных и технических объектов в криолитозоне Российской Федерации на основе систем геотехнического мониторинга топливно-энергетического комплекса // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 4, с. 3–18.

Мокшанцев К.Б. Тектоническое строение Якутской АССР / К.Б. Мокшанцев, Д.К. Горнштейн, Г.С. Гусев и др. М., Наука, 1964, 240 с.

Нерадовский Л.Г. Вероятностная модель прогноза прочности песчанников методом дистанционного индуктивного зондирования в криолитозоне Южной Якутии (на примере г. Нерюнгри) // Криосфера Земли, 2022а, т. XXVI, № 6, с. 43–57.

Нерадовский Л.Г. Оценка прочностного скально-полускального основания инженерных сооружений г. Нерюнгри в криолитозоне Южной Якутии по данным геофизики (метода дистанционного индуктивного зондирования) // Недропользование XXI век, 2022б, № 4 (96), с. 91–97.

Нерадовский Л.Г. Аprobация и верификация за пределами г. Нерюнгри вероятностной модели прогноза прочности осадочных пород // Вестн. Евразийской науки, 2023а, т. 15, № 4.

Нерадовский Л.Г. Внутренняя верификация точности вероятностной модели прочности скально-полускального основания инженерных сооружений в одном из жилых кварталов г. Нерюнгри // Вестн. Евразийской науки, 2023б, т. 15, № 3. – <https://esj.today/PDF/21NZVN223.pdf>

Нерадовский Л.Г. Ошибки средних оценок прочности массивов осадочных пород Южной Якутии по данным метода дистанционного индуктивного зондирования // Геоинформатика, 2023в, № 1, с. 48–62.

Нерадовский Л.Г. Точность решения задачи прогноза прочности осадочных пород методом дистанционного индуктивного зондирования в Центральной Якутии (станция “Олень”) // Геофизика, 2023г, № 4, с. 50–57.

Нерадовский Л.Г., Осьмушкин А.В. Ретроспективный анализ итога многолетнего изменения прочности песчанника на застроенной территории Южной Якутии (на примере

квартала “М” в г. Нерюнгри) // Бюл. строит. техники, 2023, № 5 (1065), с. 14–17.

Рекомендации по методике составления геофизических схем (моделей) скальных массивов в основаниях бетонных плотин. П 96-81. Л., ВНИИГ, 1981, 113 с.

Рекомендации по изучению методами инженерной сейсмики статических и динамических характеристик деформируемости скальных оснований гидросооружений в северной строительно-климатической зоне (ССКЗ). П 19-85. Л., ВНИИГ, 1985, 102 с.

Савич А.И. Исследование упругих и деформационных свойств горных пород сейсмоакустическими методами / А.И. Савич, З.Г. Яценко. М., Недра, 1979, 214 с.

Сясько А.А. Технология геолого-геофизического изучения выходов угольных пластов в криолитозоне / А.А. Сясько, Н.Н. Гриб, Ю.И. Скоморошко, В.М. Никитин. Якутск, ЯФ ГУ СО РАН, 2004, 160 с.

Титлинов В.С. Технология дистанционных индуктивных зондирований / В.С. Титлинов, Р.Б. Журавлева. Екатеринбург, Наука, 1995, 56 с.

Шестернёв Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001, 266 с.

Южная Якутия: мерзлотно-геологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, 444 с.

References

- Buldovich S.N., Melentiev V.S., Naumov M.S., Furikevich O.S. The role of recent faults in the formation of permafrost-hydrogeological conditions (an example of the Neryungri syncline of the Southern Yakutsian Mesozoic trough). *Merzlotnye issledovaniya* [Permafrost Research], 1976, Issue XV, p. 120–125 (in Russian).
- Vapnik V.N., Chervonenkis A.Ya. *Metod raspoznavaniya obrazov* [Pattern recognition method]. Moscow, Nauka, 1974, 416 p. (in Russian).
- Vakhromeev G.S., Davydenko Yu.A. *Modelirovanie v razvedochnoj geofizike* [Modeling in exploration geophysics]. Moscow, Nedra, 1987, 192 p. (in Russian).
- Voronkov O.K. *Inzhenernaya sejsmika v kriolitozone (izuchenie stroeniya i svoystv merzlyh i talyh gornyh porod i massivov)* [Engineering seismics in permafrost regions (study of the structure and properties of frozen and thawed rocks and masses)]. St. Petersburg, Vednnev VNIIG, 2009, 401 p. (in Russian).
- GOST 21135.2-84. *Porody gornye. Metody opredeleniya predela prochnosti pri odnoosnom szhatii* [Rocks. Methods for determination of axial compression strength]. Moscow, Izd-vo Standartov, 1984, 7 p. (in Russian).
- GOST 25100-2020. *Grunty. Klassifikaciya* [Soils. Classification]. Moscow, Standartinform, 2020, 38 p. (in Russian).
- Grib N.N., Samokhin A.V. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva uglevmeshchayushchih porod Yuzhno-Yakutskogo bassejna* [Physico-mechanical properties of coal-bearing rocks of the South Yakut basin]. Novosibirsk, Nauka, 1999, 240 p. (in Russian).
- Zhelezniak M.N. *Geotemperaturnoe pole i kriolitozona Yugo-Vostoka Sibirskoj platformy* [Geotemperature field and permafrost in the south-eastern Siberian Platform]. Novosibirsk, Nauka, 2015, 227 p. (in Russian).
- Zhelinskii V.M., Korobitsyna V.N., Karimova S.S. *Mezozojskie otlozheniya i geneticheskie tipy ugoľnyh plastov Yuzhnoj Yakutii* [Mesozoic sediments and genetic types of coal seams in

- southern Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1976, 126 p. (in Russian).
- Zhelinskii V.M. Mezozojskaya ugleonosnaya formaciya Yuzhnoj Yakutii [Mesozoic coal-bearing formation of southern Yakutia]. Novosibirsk, Nauka, 1980, 119 p. (in Russian).
- Kalinin V.M., Yakupov V.S. Regional'nye zakonomernosti povedeniya moshchnosti merzlykh tolshch [Regional patterns of permafrost behavior]. Yakutsk, YNTS SO AN SSSR, 1989, 144 p. (in Russian).
- Kolomenskii N.V. Inzhenernaya geologiya [Chast' 2 [Engineering geology]. Moscow, Gosgeolizdat, 1956, vol. 2, part 2, 320 p. (in Russian).
- Kompleks srednetchastotnoj apparatury elektromagnitnogo zondirovaniya (SEMZ). Tekhnicheskoe opisanie [The system for medium-frequency electromagnetic sounding (SEMZ). Technical specification]. Krasnoyarsk, NPO Sibsvetmetavtomatika SSSR, 1991, 30 p. (in Russian).
- Kulaichev A.P. Metody i sredstva kompleksnogo analiza dannykh [Methods and tools for integrated data analysis]. Moscow, FORUM: INFRA-M, 2006, 512 p. (in Russian).
- Lebedev V.F., Onushchenko V.I., Litvintseva L.M. Kompleks SEMZ. Metod. posobie [SEMZ system. A methodological guideline]. Krasnoyarsk, NPO Sibsvetmetavtomatika, 1991, 83 p. (in Russian).
- Levkovich A.I. Metodika obosnovaniya sostava i ob'yomov inzhenerno-geologicheskikh izyskanij dlya stroitel'stva razlichnykh tipov zdaniy i sooruzhenij promyshlennogo, sel'skohozyajstvennogo i zhilishchno-grazhdanskogo naznacheniya v rajonah rasprostraneniya vechnomorzykh gruntov s uchyotom trebovanij proektirovaniya [Methodology for defining the scope and content of engineering-geological investigations for different types of industrial, agricultural and residential buildings and structures on permafrost with consideration of design requirements]. Moscow, Gosstry RSFSR, NPO Stroyizyskaniya, 1989, 173 p. (in Russian).
- Melnikov V.P., Osipov V.I., Brouchkov A.V. et al. Development of geocryological monitoring of undisturbed and disturbed Russian permafrost areas on the basis of geotechnical monitoring systems of the energy industry. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. XXVI, No. 4, p. 3–15.
- Mokshantsev K.B., Gornshtein D.K., Gusev G.S. et al. Tektonicheskoe stroenie Yakutskoj ASSR [The tectonic structure of Yakut ASSR]. Moscow, Nauka, 1964, 240 p. (in Russian).
- 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. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. XXVI, No. 6, p. 37–49.
- Neradovskii L.G. Assessment of the strength state of the rocky-semi-rocky foundation of engineering structures in the city of Neryungri in the permafrost zone of south Yakutia according to geophysics data (remote inductive sensing method). *Nedropolzovanie XXI Vek [21 Century Subsoil Use]*, 2022, No. 4 (96), p. 91–97 (in Russian).
- Neradovskii L.G. Approbation and verification outside the city of Neryungri of a probabilistic model for predicting the strength of sedimentary rocks. *Vestnik Evrazijskoi nauki [The Eurasian Scientific Journal]*, 2023, vol. 15 (4) (in Russian).
- Neradovskii L.G. Internal verification of the accuracy of the probabilistic strength model of the rock-semi-rock foundation of engineering structures in one of the residential areas of Neryungri. *Vestnik Evrazijskoi nauki [The Eurasian Scientific Journal]*, 2023, vol. 15 (3) (in Russian).
- Neradovskii L.G. Errors in average strength estimates of sedimentary rock masses in South Yakutia based on geometric induction sounding data. *Geoinformatika [Geoinformatics]*, 2023, 1, p. 48–62 (in Russian).
- Neradovsky L.G. The accuracy of solution to the problem of forecasting the strength of sedimentary rocks by the method of remote inductive sounding in central Yakutia (Olen station). *Geofizik [Geophysics]*, 2023, No. 4, p. 50–57 (in Russian).
- Neradovskii L.G., Osmushkin A.V. Retrospective analysis of the result of long-term change of sandstone strength in the built-up area of southern Yakutia (an example of District M in Neryungri). *Biulleten Stroitelnoi Tekhniki [Bulletin of Structural Engineering]*, 2023, No. 5 (1065), p. 14–17 (in Russian).
- Rekomendacii po metodike sostavleniya geofizicheskikh skhem (modelej) skal'nykh massivov v osnovaniyakh betonnykh plotin. P 96-81 [Recommendations for the methodology of developing geophysical schemes (models) of rock masses in concrete dam foundations. P 96-8]. Leningrad, VNIIG, 1981, 113 p. (in Russian).
- Rekomendacii po izucheniyu metodami inzhenernoj seismiki staticheskikh i dinamicheskikh harakteristik deformiruемости skal'nykh osnovanij gidrosooruzhenij v severnoj stroitel'no-klimaticheskoy zone (SSKZ). P 19-85 [Recommendations for studying the static and dynamic characteristics of the deformability of rock foundations of hydraulic structures in the northern construction-climatic zone (NCZ) using engineering seismic methods. P 19-85]. Leningrad, VNIIG, 1985, 102 p. (in Russian).
- Savich A.I., Yashchenko Z.G. Issledovanie uprugih i deformatsionnykh svoystv gornykh porod seismoakusticheskimi metodami [Study of elastic and deformation properties of rocks using seismoacoustic methods]. Moscow, Nedra, 1979, 214 p. (in Russian).
- Syasko A.A., Grib N.N., Skomoroshko Yu.I., Nikitin V.M. Tekhnologiya geologo-geofizicheskogo izucheniya vyhodov ugol'nykh plastov v kriolitozone [Technology of geological and geophysical study of coal seam outcrops in the permafrost zone]. Yakutsk, YaF GU SO RAN, 2004, 160 p. (in Russian).
- Titlinov V.S., Zhuravleva R.B. Tekhnologiya distancionnykh induktivnykh zondirovanij [Technology for distance inductive soundings]. Yekaterinburg, Nauka, 1995, 56 p. (in Russian).
- Shesternev D.M. Kriogipergenez i geotekhnicheskie svoystva porod kriolitozony [Cryohypergenesis and geotechnical properties of permafrost rocks]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2001, 266 p. (in Russian).
- Yuzhnaya Yakutiya: merzlotno-gidrogeologicheskie i inzhenerno-geologicheskie usloviya Aldanskogo gornopromyshlennogo rajona [Southern Yakutia: permafrost-hydrogeological and engineering-geological conditions of the Aldan mining region]. V.A. Kudryavtsev (ed.). Moscow, Moscow Univ. Press, 1975, 444 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 6 ноября 2023 г.,
после доработки – 11 июня 2024 г.,
принята к публикации 20 июня 2024 г.*