



ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНОГО ФОНА ПРОЧНОСТИ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД, СЛАГАЮЩИХ ОСНОВАНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ЮЖНОЙ ЯКУТИИ



Нерадовский Л.Г.
д-р техн. наук
ИМЗ СО РАН
ст. науч. сотр.
лаборатории инженерной
геокриологии
L031950N@ia.ru

В статье представлен результат обобщения прочности осадочных пород Южной Якутии, слагающих основания инженерных сооружений в пределах слоя годовых теплооборотов. Установлено, что в этом слое вероятностные распределения значений прочности песчаников, доломитов и известняков в прогнозируемом водонасыщенном состоянии могут быть описаны теоретически законом Вейбулла. Единичные значения прочности пород изменяются от 2,53 до 175,25 МПа. Несмотря на широкий диапазон случайных пространственных вариаций наблюдается устойчивая межлитогенная близость средней медианной прочности пород, равная 42,46-47,57 МПа. Исключения составляют доломиты и известняки, глубоко залегающие под четвертичными отложениями на переходе между Лено-Алданским плато и Центрально-Якутской равниной. Здесь средняя прочность пород уменьшается до 26,15-36,66 МПа. По статистике в Южной Якутии почти в 80 % случаев встречаются скальные осадочные породы, относящиеся по инженерно-геологической классификации к средней-прочной категориям (15-120 МПа). Общие среднее медианное и модальное значения прочности пород, равные 46,00 и 42,70 МПа, рассматривается, как начальные и ранее неизвестные оценки регионального фона прочности осадочных пород в пределах изученной части Южной Якутии.

Ключевые слова: Южная Якутия, осадочные породы, песчаники, доломиты, известняки, прочность воздушно-сухих и водонасыщенных пород, местный и региональный фон прочности, инженерно-геологические категории прочности пород.

Осадочные породы по своей распространённости во всём мире занимают первое место среди других пород и служат скально-полускальным основанием для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Поэтому научно-производственное изучение прочности осадочных пород и в настоящее время не теряет своей актуальности при продолжении промышленного освоения новых территорий на северо-востоке нашей огромной страны. Примером этому служит территории Южной Якутии, где наряду с интрузивными и метаморфическими породами в многочисленных мезозойских впадинах (грабенах) распространены вечно-многолетнемёрзлые осадочные породы. Отмеченный регион Якутии хорошо изучен в геологическом и ещё более в инженерно-геологическом отношении. Однако обобщающих работ по изучению главной проектно-строительной механической характеристики осадочных пород нет. Речь идёт о изучении прочности пород в очень сложном и не устойчивом по пространственно-временной динамике слое годовых теплооборотов. В нём постоянно происходит интенсивное механическое и тепловое взаимодействие пород с фундаментами инженерных сооружений.

Отсутствие обобщающих работ само по себе есть редкое явление в современной научной жизни. Плюс к этому сложившаяся в условиях рыночной экономики практика ведомственной закрытости и редкой публикуемости в научно-технических журналах огромного количества результатов инженерно-геологических изысканий. Появление возможности систематической работы с материалом инженерно-геологических изысканий в архиве ООО «Нерюнгростройизыскания», а также имеющийся материал геофизических экспериментов позволили обобщить некоторую часть данных инженерно-геологических изысканий. На этой основе с привлечением классических методов теории вероятности и математической статистики решена важная задача геомеханики и петрофизики слоя годовых теплооборотов с получением ранее неизвестных теоретико-практических оценок региональной фоновой прочности осадочных пород Южной Якутии.

Район исследований

Район изучения локально-местной и региональной фоновой прочности осадочных пород включал в себя четыре участка с разными инженерно-геологическими условиями строительства и эксплуатации объектов гражданской и транспортной инфраструктуры Южной Якутии. Участки разделены между собой расстояниями в сотни километров.

Первый участок находится в г. Нерюнгри – административном центре Южной Якутии. По данным ООО «Нерюнгростройизыскания» и региональных исследований [6, 9, 21] доминирующим литотипом в толще мезозойских углевмещающих осадочных пород Южной Якутии, включая г. Нерюнгри, является кварцполевошпатовый песчаник разной зернистости и цветности. Кроме этого, в г. Нерюнгри есть еще одна природная черта, присущая всей Южной Якутии. Это – неоднородность и высокая изменчивость прочности осадочных пород, изначально разуплотненных процессами разрывной и пликвативной тектоники с образованием по отношению к главным тектоническим разломам очень сложной системы разветвлённых линейментов зон дробления и трещиноватости [2; 13]. Образно говоря, эта система похожа на «разбитую тарелку». Позднее на результат действия тектонических процессов наложился экзогенно-криогенные процессы, включая процесс криогенеза (физического и химического выветривания) [20]. В результате на территории Южной Якутии образовалась неустойчивая во времени прерывисто-островная криолитозона. Ее геометрическое строение, мощность и температура регулируются климатом, ландшафтом, а также высотой рельефа местности [8, 21]. Эти внешние факторы сопровождаются мощными внутриземными тепловыми потоками, которые поступают к поверхности Земли по зонам тектонического дробления и трещиноватости [8]. По данным Р.Г. Сысолятина и М.Н. Железняк [19] мощность высокотемпературной прерывисто-островной мерзлоты на водораздельных пространствах Южной Якутии сравнительно небольшая и в пределах Алдано-Чульманской депрессии преимущественно равна 20-50 м. Среднегодовая температура осадочных пород в примыкании к нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10-15 м, близка к нулю градусов по Цельсию. В г. Нерюнгри по данным термометрии изыскательских скважин мощность мерзлоты равна 13-18 м. Почти такая же и мощность слоя годовых теплооборотов. По данным режимной термометрии изыскательских скважин мощность этого слоя равна 11-18 м. Температура пород в нём на глубине 8-10 м изменялась в диапазоне – (0,1÷0,4)°С. На участках природного отсутствия мерзлоты и/или антропогенно-техногенной её деградации под аварийными зданиями и сооружениями температура на указанной глубине повышалась до плюс 1-8°С.

Второй участок длиной 52 км расположен в 421 км от г. Нерюнгри в направлении на северо-восток по трассе Амуро-Якутской железнодорожной магистрали (АЯМ) между стан-

цией «Верхняя Амга» и разъездом «Болотный». Геоморфологически участок занимает пологий склон таёжной долины мелководной р. Модут. Абсолютные отметки высоты рельефа русла и склона долины изменялись от 319 до 416 м. По данным АО «Мосгипротранс» основание проектируемой трассы АЯМ сложено неизвестного возраста доломитами, залегающими под слоем делювия-элювия, мощностью 2,1-23,4 м. В 72,3% случаев мощность не превышала 10 м. По описанию керна скважин трещины доломитов были повсеместно заполнены большим количеством глинистого материала. По данным режимной термометрии изыскательских скважин мощность слоя годовых теплооборотов изменялась от 9 до 20 м. Температура на глубине 10-15 м изменялась от -0,8 до -4,8°C при среднем значении -3,4°C.

Третий участок также расположен на северо-востоке Южной Якутии, но уже в пределах границ небольшой по размерам железнодорожной станции АЯМ «Кюргеллях». От г. Нерюнгри станция находится в 572 км на вершине и пологих склонах водораздела двух ручьев: Орто-Тала и Аччыгый-Тала. Абсолютные отметки рельефа водораздела изменялись от 513 до 529 м. По данным Якутского треста инженерно-геологических изысканий (ЯкутТИСИЗ) скально-полускальное грунтовое основание станции сложено нижнекембрийскими доломитами и известняками Олекминской свиты. Прочность осадочных пород в сильнейшей степени ослаблена множеством разрывных тектонических зон дробления и трещиноватости. Сверху породы покрыты четвертичными и древними элювиальными отложениями. Древний элювий представлен плотными песчанистыми глинами и распространён в тектонических впадинах. В примыкании к впадинам и в самих впадинах мощность древнего делювия увеличивается до 4,5-8,6 м и более. По данным В.М. Калинина, В.С. Якупова [10] и М.Н. Железняк [8] мощность мерзлоты в районе станции «Кюргеллях» аномально большая и достигает 600-800 м. По данным режимной термометрии изыскательских скважин мощность слоя годовых теплооборотов изменялась от 18 до 26 м. Температура на глубине 10 м изменялась в диапазоне $-(0,5 \div 1,8)$ °C при среднем значении $-1,5^\circ\text{C}$.

Четвертый участок расположен опять же на северо-восточной окраине Южной Якутии в пределах границ площадки станции АЯМ «Олень» в 682 км от г. Нерюнгри. В структурно-геологическом отношении станция «Олень» находится в районе перехода с Лено-Алданского плато на Центрально-Якутскую равнину. Геоморфологически место расположения станции выбрано проектировщиками на склоне ручья Ойос-Ордох –

правого притока р. Лютенга. Высота рельефа на станции изменялась от 320 до 340 м. По данным ЯкутТИСИЗ нижнекембрийские карбонатные осадочные породы, как и на предыдущем участке, сложены переслаивающимися доломитами и известняками, залегающими на глубине 12-19 м. Сверху породы покрыты мерзлыми четвертичными отложениями смешанного генезиса (аллювиального, озерно-болотного и делювиально-элювиального). До глубины 3-5 м состав отложений глинистый с чередованием глин, суглинков и супесей. Ниже, залегают пески с линзами гравийных грунтов. В районе станции «Олень» мерзлота имеет уже сплошное распространение, а её мощность в сравнении со станцией «Кюргеллях» резко уменьшается до 200-300 м [8, 10]. По данным режимной термометрии изыскательских скважин мощность слоя годовых теплооборотов изменялась от 16 до 23 м. Тепловой режим в этом слое был стационарным. Температура пород на глубине 10-15 м изменялась от -1,4 до -2,1°C при среднем значении -1,8°C.

Методика исследований

Методика инженерно-геологических исследований, объектом которых служили осадочные породы, состояла в последовательном производстве следующих работ: бурения скважин; лабораторных определений физико-механических и химических свойств пород и воды; ртутной или полупроводниковой термометрии скважин с измерением температуры пород по стволу скважин. Скважины бурились чаще всего до глубины от 3-5 до 8-10 м и реже, до 15-20 м. Применялся колонковый способ бурения с продувкой ствола скважин сжатым воздухом. Прочность пород изучена путем отбора монолитов пород из керна скважин на разной глубине. Применялась схема неравномерного избирательного отбора по одному-трём монолитам из каждой литологической и прочностной разности пород. Схема была разработана в прошлом веке для проектно-изыскательских организаций НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР [12]. Казалось бы, схема устарела, однако благодаря оптимальному сочетанию показателей геологической информативности и экономической выгоды она не только до сих пор актуальна, но и ещё более востребована в современных условиях рыночной экономики. По указанной схеме массив осадочных пород опробован в 430 точках скважин преимущественно на глубине от 5-8 до 11-18 м ниже выветренной части осадочных пород. Указанный интервал охватывал сильнотрещиноватую часть пород с хаотической системой открытых трещин и трещиноватую часть пород с упорядоченной системой ориентации закрытых волосяных трещин. Пере-

численные части пород в порядке их упоминания называются в изысканиях «рухляком», «разборной скалой» и «монолитной скалой».

Среди списка физико-механических свойств осадочных пород главным предметом исследований являлась прочность. Объясняется это следующими причинами. Во-первых, с точки зрения инженерно-строительных изысканий эта механическая характеристика наиболее важна для проектировщиков. Значения прочности они используют для расчёта несущей способности оснований инженерных сооружений и их планировки в местах с распространения прочных несжимаемых под вертикальными нагрузками пород разного генезиса и возраста с жёсткими структурными кристаллическими и цементационными связями. Во-вторых, с научной точки зрения прочность пород с жёсткими или нежёсткими связями представляет собой системную интегральную характеристику. Иначе сказать, ту характеристику, в которой заключён итоговый результат сложнейшего и непознаваемого в своей сути закономерного и разветвлённого на разных иерархических системных уровнях причинно-следственного разнонаправленного процесса взаимодействия в пространстве множеств и подмножеств всех известных и неизвестных грунтово-мерзлотных факторов. В объединённом виде производственно-научную самодостаточность прочности вместе с грансоставом и влажностью (льдистостью) впервые в инженерной геокриологии доказал И.Е. Гурьянов на строгом языке математической логики для всех классов, типов и видов мёрзлых пород [7].

За количественную оценку прочности осадочных пород применялись значения R_{cw} – временного предела прочности на одноосное сжатие образцов скально-полускальных грунтов, искусственно замоченных водой. Эта характеристика широко применяется, как в отечественном грунтоведении, так и в зарубежной геотехнике. Порядок определения значений R_{cw} , как и значений прочности в воздушно-сухом состоянии установлен до сих пор действующим ГОСТ 21135.2-84 [3]. В соответствии с этим документом из каждого монолита пород изготовлялось несколько образцов. По результатам их испытаний механическими вертикальными нагрузками для каждого монолита вычислялись средние арифметические значения прочности. Ошибки вычислений оценивались с надёжностью 80,0 % и не должны были превышать ± 20 % при условии постановки лабораторных опытов в массовом производственном порядке. Конкретные ошибки неизвестны. Они не приводились в технических отчетах по инженерно-геологическим изысканиям.

Вероятностно-статистический анализ изменчивости в слое годовых теплооборотов прочности осадочных пород сделан с помощью программы А.П. Кулаичева «Стадия» [11]. Цель анализа – изучить законы и статистики вероятностных распределений значений R_{cw} . Случайный непредсказуемый разброс нормативных (средних) значений R_{cw} оценивался в границах доверительного интервала с вышеуказанной надёжностью 80,0%. В привычных таблицах дескриптивных описательных статистик такой уровень доверия соответствует теоретическому значению стандартного (среднеквадратичного) отклонения, умноженного на эмпирический коэффициент 1,28 [16, с. 317].

Фоновая прочность осадочных пород

Понятие «фон» весьма многогранно и используется во всех сферах человеческой деятельности. Поэтому общей формулировки этого понятия нет. Применительно к наукам о Земле оно означает наиболее часто встречаемое значение какой-либо геологической или геофизической характеристики пород на исследуемой площади, которое оценивается разными средними показателями. Среди них универсальным и надёжным показателем в математической статистике принято считать среднее медианное значение. Оно применимо для всех типов и видов вероятностных распределений независимо от объёма выборки или проще говоря, количества определений значений исследуемых характеристик пород.

Рассмотрим результаты изучения фоновой прочности осадочных пород Южной Якутии, руководствуясь одним из фундаментальных научных принципов «от частного к общему». В первую очередь ознакомимся с результатом изучения локально-местного фона прочности по отдельному взятому участку инженерно-геологических изысканий, а затем перейдем к обобщению с оценкой регионального фона прочности в масштабе всех изученных участков Южной Якутии.

Частные оценки локально-местного фона прочности осадочных пород рассмотрим по 2 направлениям. Первое направление – изучение рядов вероятностных распределений характеристики R_{cw} в групповых выборках, образованных по литотипам осадочных пород. Второе направление аналогично первому направлению, но с разбиением фактического материала по инженерно-геологическим категориям прочности пород в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [5].

По данным статистики (*табл. 1*) в подавляющем большинстве случаев (73,7 %) среди осадочных пород лучше всего изучена прочность песчаников в г. Нерюнгри. Здесь единичные

значения R_{cw} распределены в доверительном интервале 5,05-107,73 МПа со средним медианным фоновым показателем прочности 47,57 МПа. Близок к нему среднеарифметический показатель прочности со значением 56,39 МПа. Модальный показатель средней прочности намного больше – 113,74 МПа. В сопоставлении средних оценок локально-местного фона прочности песчаников и без строгой тестовой проверки нулевой гипотезы приходит понимание, что равновероятностное распределение по закону больших чисел [1, 17] единичных значений R_{cw} возле средних значений нарушается присутствием компактного подмножества, сдвинутого в сторону больших значений R_{cw} .

Местный фон прочности доломитов на станции АЯМ «Верхняя Амга»-разъезд «Болотный», оцененный по среднему медианному значению, равен 45,25 МПа. Опять же к этому значению близко среднеарифметическое значение 41,16 МПа. Единичные значения R_{cw} распределены в доверительном интервале 14,02-94,30 МПа. Модального среднего значения прочности доломитов в **табл. 1** нет. Оно не вычислено предположительно из-за отсутствия концентрации значений R_{cw} в каком-либо месте вероятностного ряда.

На станции «Кюргеллях» единичные значения R_{cw} слоёв доломитов и известняков варьируют в доверительных интервалах 26,48-73,68 и 7,39-69,27 МПа. Медианный фон прочности у доломитов равен 46,74 МПа, а у известняков немного меньше – 42,46 МПа.

На станции «Олень» местный медианный фон прочности снижается. У доломитов до 36,66 МПа, а у известняков больше – до 26,15 МПа. Случайные вариации значений R_{cw} происходят в доверительных интервалах 19,73-41,23 и 10,13-28,33 МПа соответственно. В сравнении со стан-

цией «Кюргеллях» местный литогенный фон прочности доломитов и известняков на станции «Олень» уменьшился в 3,5 раза. Аномально высокая разница фона объясняется тем, что станция «Олень» расположена на границе структурного перехода толщи осадочных пород с Лено-Алданского плато на Центрально-Якутскую низменность. В окрестности этого перехода, сопряжённого с крупным тектоническим разломом в зоне сильного механического напряжения, оказалась станция «Олень». Здесь разуплотнение осадочных пород существенно. Если степень разуплотнения пород оценивать, сравнивая среднезвешенные по числу определений медианные значения общей фоновой прочности доломитов и известняков между станциями «Кюргеллях» и «Олень» (45,15 и 17,05 МПа), то она в относительном измерении составит 37 %.

К сожалению, и об этом нужно сказать, для оценки интегральной изменчивости местного фона прочности осадочных пород нельзя использовать коэффициент вариации. Связано это ограничение с тем, что оценки вариативности получены по выборкам с очень большой разницей по числу определений. В больших выборках широта изменчивости увеличивается, а в малых выборках наоборот, уменьшается. Такой механизм экранирует истинную динамику фоновой прочности литотипов осадочных пород, создавая иллюзию уменьшения этой динамики в направлении от песчаников к доломитам и известнякам. Однако в пределах третьего и четвёртого участков, где распространены доломиты и известняки с близким числом определений R_{cw} задача сравнения изменчивости этой характеристики решается корректно. Результат решения показан в **табл. 1**. По её данным интегральные вариации прочности доломитов и известняков на

Таблица 1.
Прочность литотипов осадочных пород.

Статистика	Значения характеристики R_{cw} , МПа				
	1	2	3	4	1-4
Среднее арифметическое	56.39	54.16	50.08/38.83	30.48/19.23	54.95
Медианное среднее (фон)	47.57	45.25	46.74/42.46	36.66/26.15	46.00
Модальное среднее	113.74	–	60.03/50,07	–	56.73
Стандартное отклонение	51.24	40.14	23.60/30.94	10.75/9.10	48.50
Коэффициент вариации, %	90.9	74.1	47.1/79.7	35.3/47.3	88.3
Минимум	2.53	7.83	21.47/13.65	36.93/26.47	2.53
Максимум	175.2	128.15	109.34/62.18	52.81/27.07	175.25
Кол-во определений	317	53	27/16	8/9	430
Доля определений, %	73.7	12.3	6.3/3.7	1.9/2.1	100

Примечания: 1 – песчаники г. Нерюнгри; 2 – доломиты станции «Верхняя Амга»-разъезд «Болотный»; 3 – доломиты/известняки станции «Кюргеллях»; 4 – доломиты/известняки станции «Олень».

станции «Кюргеллях» равны 47,1 и 79,7 %, а на станции «Олень» – 35,3 и 47,3 %. Попарное сравнение этих цифр показывает, что разница в вариациях прочности одинакова, как между породами, так и между станциями. У доломитов разница составляет 28,6 %, а у известняков – 51,0 %.

Рост вариаций происходит не только при снижении прочности доломитов и известняков Южной Якутии. Эта эмпирическая закономерность носит общий характер для всех горных пород. Она давно известна геофизикам, которые эффективно использовали и продолжают использовать её при картировании границ тектонических зон дробления и трещиноватости, а также границ распространения мёрзлых пород с высокой температурой и решения иных инженерно-геологических задач, о чём свидетельствуют публикации в книгах, монографиях и научно-технических журналах.

В целом, на протяжении нескольких сотен километров от г. Нерюнгри случайные вариации единичных значений прочности осадочных пород Южной Якутии происходили в широких границах доверительного интервала 6,45-103,45 МПа. Кроме станции «Олень» межстанционные и межлитогенные вариации прочности пород в сторону повышения или снижения относительно регионального фона со средним медианным значением 46,00 МПа (см. *табл.1*) были незначительны и с вероятностью 75,0 % не превышали 10 %. Эти факты достаточны для доказательства однородности фонового пространства прочности разных по генезису, возрасту, строению, составу, свойствам и температуре литогенных разностей осадочных пород в пределах границ слоя годовых теплооборотов. Иллюстрацией всему сказанному служит *рис. 1*.

Региональная фоновая составляющая прочности осадочных пород Южной Якутии проявляет себя максимумом на сводной гистограмме (*рис. 2*). Максимум имеет сложную форму и сдвинут в область часто встречающихся значений прочности осадочных пород со средне-интервальными значениями 9,1-62,3 МПа. Широта изменчивости большая. Она кроме категории очень прочных пород (выше 120 МПа) охватывает все установленные ГОСТ 25100-2020 [5] инженерно-геологические категории пород в их прогнозируемом по лабораторным или геофизическим данным водонасыщенном состоянии.

По результатам анализа эмпирического вариационного ряда, отсортированного и упорядоченного в направлении роста значений $R_{св}$ категория пород средней прочности (15-50 МПа) наиболее распространена в Южной Якутии. Её доля в общей совокупности определений значений $R_{св}$ составляет 44,8 % (*табл. 2*). К этой категории примыкает прочная категория (50-120 МПа) с долевым участием в 34,1 %. Породы очень прочной категории (выше 120 МПа) встречаются сравнительно редко и рассматриваются, как аномальные события. На гистограмме они образуют так называемый в математической статистике «хвост» со средне-интервальными значениями $R_{св}$ выше 128,7 МПа. Их доля равна 9,2 %. К редким, но уже не аномальным событиям относится встречаемость в Южной Якутии совместных категорий пород малопрочных (5-15 МПа), пониженной прочности (3-5 МПа) и низкой прочности (ниже 3 МПа) Их доля не превышает 12 %.

В целом, и это хорошо видно на *рис. 2*, вероятностная структура изменчивости прочности всей совокупности изученных осадочных пород теоретически не описывается законом больших чисел. Проверка по критериям Колмогорова и

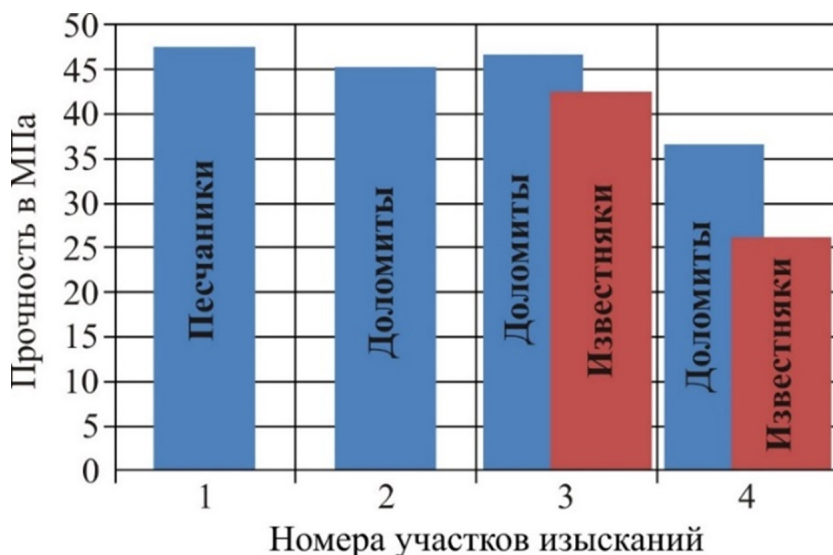


Рис.1. Диаграмма пространственной динамики фоновой прочности литотипов осадочных пород между участками инженерно-геологических изысканий. Расшифровка номеров участков: 1 – г. Нерюнгри; 2 – Станция «Верхняя Амга-разъезд «Болотный»; 3 – станция «Кюргеллях»; 4 – станция «Олень». Общий объём выборки – 430 определений.

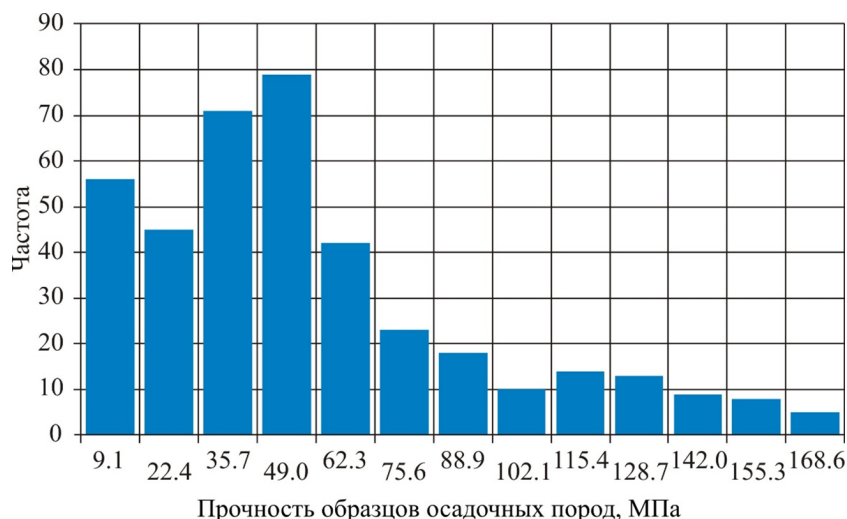


Рис. 2. Вероятностное распределение по лабораторным данным прочности объединённых литотипов осадочных пород по всем участкам инженерно-геологических изысканий. Объём выборки – 430 определений.

Таблица 2. Прочность осадочных пород по инженерно-геологическим категориям.

Статистика	Значения характеристики R_{cw} , МПа				
	1	2	3	4	1-4
Среднее арифметическое	10.23	35.07	73.54	141.81	54.95
Медианное среднее	11.01	36.81	67.43	137.63	46.00
Модальное среднее	6.33	15.27	56.70	123.67	56.73
Стандартное отклонение	4.31	13.50	25.15	20.95	48.51
Коэффициент вариации, %	33.7	30.1	26.7	11.9	68.9
Минимум	2.53	15.01	50.17	121.40	2.53
Максимум	14.78	49.65	119.30	175.25	175.25
Количество определений	47	176	134	36	393
Доля определений, %	11.9	44.8	34.1	9.2	100
Уровень надежности (95,0 %)	1.00	1.57	3.35	5.54	3.76

Примечания: 1 – осадочные породы малой, пониженной и низкой категории прочности с R_{cw} меньше 15 МПа; 2 – средняя категория прочности пород с R_{cw} от 15 до 50 МПа; 3 – породы прочной категории с R_{cw} от 50 до 120 МПа; 4 – породы очень прочной категории с R_{cw} больше 120 МПа.

Омега-квадрат [11] меры согласия рассматриваемой вероятностной структуры с разными теоретическими законами ненормального распределения, установила следующее. Точнее всего структура корректно описывается известным и широко применяемым в технических приложениях и теории надёжности законом Вейбулла [4] с параметрами масштаба $a=61,02$ и формы $b=1,513$. По этим параметрам с помощью программы «Стадия» [11] решена задача моделирования ряда вероятностного распределения значений R_{cw} осадочных пород Южной Якутии. Результат моделирования показан на рис. 3. Сравнение гистограммы этого рисунка с гистограммой рис. 2 показывает их сходство в главных чертах структуры вероятностной изменчивости прочности. В фактической структуре экстремальные средне-интервальные значения R_{cw} , равны 35,70 и 49,00 МПа. Почти такие же значения наблюдаются и в модельно-теоретической структу-

ре – 26,13 и 43,47 МПа. Средневзвешенные по числу определений модальные значения отмеченных структур равны 42,70 и 33,87 МПа. Они идентифицируются, как практические и теоретические оценки регионального фона.

Близость к теоретической оценке повышает надёжность эмпирических оценок регионального фона прочности осадочных пород Южной Якутии, равных по медианному среднему показателю 46,00 МПа (см. табл. 1) и 42,70 МПа по модальному среднему показателю (см. рис. 2). В сравнении с теоретическими оценками ошибки определения этих показателей вычислим в 2-х вариантах. В первом варианте вычисление сделаем при сравнении со значением параметра масштаба вариограммы закона Вейбулла (61,02 МПа). Допуская при этом, что этот параметр означает неизвестный средний показатель фона. Второй вариант вычисления исключает эту неопределённость, применяя при сравнении вышеприведённое значение теорети-



Рис.3. Модель вероятностного распределения по лабораторным данным прочности осадочных пород Южной Якутии по всем участкам инженерно-геологических изысканий: 1 – гистограмма; 2 – вариограмма закона Вейбулла. Объем выборки – 430 определений.

ческого регионального фона, равное 33,87 МПа. В первом варианте сравнения ошибки равны 28,1 и 35,3 %, а во втором варианте – 30,4 и 21,3 %. Разница в ошибках эмпирических оценок регионального фона прочности осадочных пород Южной Якутии невелика и обратно пропорциональна применяемым вариантам решений.

Информационный вес и научная значимость эмпирических оценок регионального фона прочности осадочных пород Южной Якутии усилятся при расширении масштаба сравнения этих оценок. Например, с оценками, которые были получены в прошлом веке на территории бывшей Российской Советской Федеративной Республики (РСФСР). На этой территории усилиями 39 институтов, предприятий и организаций были проведены многолетние исследования горно-геологических и строительных характеристик прочности минералов, руд, магматических, метаморфических и осадочных пород месторождений полезных ископаемых РСФСР [18]. По этим данным автор настоящей статьи сделал обобщение по выборке, состоящей из 685 лабораторных значений прочности воздушно-сухих образцов песчаников, которые были отобраны из керна скважин или подземных горных выработок на глубине в несколько сотен метров. По совокупности этих значений вычислена средняя медианная оценка регионального фона прочности воздушно-сухих песчаников РСФСР, равная 84,53

МПа [14]. Сравним этот поистине региональный фон с местным фонем песчаников г. Нерюнгри, напомнив при этом, что этот фон практически не отличается от регионального фона осадочных пород Южной Якутии (см. *табл. 1*). Однако прежде, чем решать задачу сравнения необходимо фон прочности песчаников, равный в прогнозируемом водонасыщенном состоянии 47,57 МПа, пересчитать в воздушно-сухое состояние. Решим эту задачу путём умножения 47,57 МПа на эмпирический коэффициент 1,47 [15]. В результате получим 69,87 МПа. По отношению к фоню прочности песчаников РСФСР разница невелика и составляет 19 %. При такой разнице резонно сделать следующие выводы.

Во-первых, в изученных частях Южной Якутии и бывшей РСФСР вероятностные оценки регионального фона прочности осадочных пород в воздушно-сухом состоянии и предположительно в прогнозируемом водонасыщенном состоянии практически равны. Во-вторых, региональный фон прочности осадочных пород Южной Якутии, слагающих основания инженерных сооружений в слое годовых теплооборотов до глубины 10-20 м, не более чем на двадцать процентов ниже аналогичного фона в РСФСР, где главные представители осадочных пород песчаники, изучены на глубине в первые сотни метров. В-третьих, в Южной Якутии и возможно в РСФСР по принятой инженерно-геологиче-

ской классификации осадочные породы даже в прогнозируемом водонасыщенном состоянии соответствуют типу скальных грунтов, которые благоприятны для строительства и долговременной эксплуатации инженерных сооружений. В-четвёртых, вероятностные структуры изменчивости и в Южной Якутии, и в РСФСР прочности осадочных пород в естественном воздушно-сухом, и прогнозируемом водонасыщенном состоянии близки к описанию одним и тем же теоретическим законом Вейбулла.

Перечисленные выводы важны не только для наук о Земле (инженерной геология, грунтоведения), но и для математических наук – теории вероятности и математической статистики. Содержащиеся в выводах новые знания расширяют границы существующих представлений об общности и неразрывном единстве геологических систем Земли в части закономерной изменчивости прочности осадочных пород. Причём, как в верхней части криолитозоны – слое годовых теплооборотов, так и ниже на глубине в сотни метров в пределах огромной территории России, частью которой является регион Южной Якутии. Стоит добавить, что в констатации факта разноглубинной закономерности в настоящей статье подтверждается давно известное в геологии эмпирическое правило о «вершках» и «корешках». Исползуя это правило по «вершкам» – ореолам рассеяния на поверхности Земли геохимических элементов почти без ошибок и без бурения большого количества скважин геологи находили «корешки» – местоположения рудных полезных ископаемых. Точно таким же образом по геоботаническим признакам гидрогеологи и мерзлотоведы решали задачи поиска подземных вод и таликов.

В производственном отношении результаты исследований могут заинтересовать проектировщиков и геологов-изыскателей. Это оценки регионального фона прочности пород и их инженерно-геологическая классификация по категориям прочности. По отношению к оценкам фона корректно решаются задачи разномасштабного районирования застраиваемых территорий Южной Якутии по показателю прочности скально-

полускальных грунтов. Выделяя при этом границы участков с благоприятными (прочность выше регионального фона) и неблагоприятными (прочность ниже регионального фона) условиями строительства и эксплуатации инженерных сооружений. Не пренебрегая, а дополняя существующую классификацию осадочных пород по категориям прочности. В этом отношении для проектировщиков важно предварительно знать, что на изученной территории Южной Якутии с вероятностью 78,9 % осадочные породы, слагающие основания инженерных сооружений даже в прогнозируемом водонасыщенном состоянии, характеризуются, как скальные грунты средней категории прочности (15-50 МПа) и прочной категории (50-120 МПа).

Заключение

Вероятностно-статистический анализ материалов инженерно-геологических изысканий в Южной Якутии, полученных в прошлом веке в окрестности г. Нерюнгри в северо-восточном направлении по железнодорожной трассе АЯМ на разрозненных участках с расстоянием между ними в сотни километров, установил следующее. Изменчивость прочности разных по генезису, возрасту, строению, составу и температуре осадочных пород в слое годовых теплооборотов до глубины 10-20 м корректно и точнее всего аппроксимируются законом Вейбулла с близкими эмпирическими и теоретическими оценками регионального фона прочности. Первые оценки фона равны 42,74 и 46,00 МПа, а вторые оценки – 33,87 и 61,02 МПа. Средняя разница в медианных оценках фона равна 33 %. Случайные локально-местные вариации регионального фона незначительны и с вероятностью 75,0 % не превышают 10 %. Начатые исследования регионального фона прочности осадочных пород рекомендуется продолжать в других местах промышленно-гражданского освоения Южной Якутии. В первую очередь, решая комплексные задачи недропользования в районе крупного по запасам и по качеству нового разрабатываемого Эльгинского месторождения каменного угля. **xx**

Приношу глубокую благодарность гл. инженеру ООО «Нерюнгростройизыскания» А.В. Осьмушкину за предоставленную возможность работать с материалом инженерно-геологических изысканий по г. Нерюнгри. Исследования выполнены по госбюджетному финансированию в лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в рамках НИР 2024 г. по программе СО РАН «Устойчивость природно-технических систем в криолитозоне и разработка технологий использования криогенных ресурсов». Регистрационный номер АААА-А20-120111690011-9.

Литература

1. Бернулли Я. О законе больших чисел: пер. с лат. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 176 с.
2. Булдович С.Н., Мелентьев В.С., Наумов М.С., Фурикевич О.С. Роль новейших разрывных нарушений в формировании мерзлотно-гидрогеологических условий (на примере Нерюнгринской синклинали Южно-Якутского мезозойского прогиба) // Мерзлотные исследования. Вып. XV. Москва. Изд-во Моск. ун-та. 1976. С. 120–125.
3. ГОСТ 21135.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1984. 7 с.
4. ГОСТ 50779.27–2017 (МЭК 61649: 2008). Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. – М.: Стандартинформ, 2017. – 58 с.
5. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2020. 38 с.
6. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. Новосибирск: Наука, 1999. 240 с.
7. Гурьянов И.Е. Инженерная криолитология: прочность вечномёрзлых грунтов / отв. ред. Ю.В. Шумилов. Новосибирск: Изд-во «ГЕО», 2009. – 139 с.
8. Железняк М.Н. Геотемпературное поле и криолитозона юго-востока Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 2005. 227 с.
9. Желинский В.М. Мезозойская угленосная формация Южной Якутии / отв. ред. А. К. Матвеев. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1980. 119 с.
10. Калинин В.М., Якупов В.С. Региональные закономерности поведения мощности мерзлых толщ. Якутск: ЯНЦ СО АН СССР, 1989. 144 с.
11. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. 512 с.
12. 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 РФСР. НПО Стройизыскания, 1989. 173 с.
13. Мокшанцев К.Б., Горнштейн Д.К., Гусев Г.С. и др. Тектоническое строение Якутской АССР. – М.: Наука, 1964. 240 с.
14. Нерадовский, Л.Г. Прочность скального основания инженерных сооружений в криолитозоне Южной Якутии (г. Нерюнгри) // Вестник Евразийской науки. – 2022. – Том. 14. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/01NZVN222.pdf>. DOI: 10.15862/01NZVN222.
15. Нерадовский Л.Г., Осьмушкин А.В. Снижение прочности песчаника в криолитозоне Южной Якутии при переходе в прогнозируемое водонасыщенное состояние (на примере жилого квартала в г. Нерюнгри) // Вестник Евразийской науки. – 2024. – Том. 16. – № 2. – URL: <https://esj.today/PDF/21NZVN224.pdf>.
16. Общая теория статистики. –М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. –327 с.
17. Пасхавер, И.С. Закон больших чисел и статистические закономерности. М.: Статистика, 1974. 152 с. – (Математическая статистика для экономистов).
18. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Н.В. Мельникова и др. – М.: Недра, 1975. – 279 с.
19. Сысолятин Р.Г., Железняк М.Н. Геокриологические условия Токарикского и Гувилгринского грабенов (Южная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2023, № 28(2), с. 261–274. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-2-261-274>.
20. Шестернев Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойств пород криолитозоны. Новосибирск: СО РАН, 2001. 266 с.
21. Южная Якутия: мерзлотно-гидрогеологические и инженерно-геологические условия Алданского горнопромышленного района / Под ред. В.А. Кудрявцева. М.: МГУ, 1975. 444 с.

UDC: 552.513

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

ASSESSMENT OF THE REGIONAL BACKGROUND STRENGTH OF SEDIMENTARY ROCKS FORMING THE FOUNDATIONS OF ENGINEERING STRUCTURES IN SOUTH YAKUTIA

Abstract: The article presents the result of a generalization of the strength of sedimentary rocks of Southern Yakutia, which form the foundations of engineering structures within the layer of annual heat circulation. It has been established that in this layer the probability distributions of the strength values of sandstones, dolomites and limestones in the predicted water-saturated state can be described by the theoretical Weibull law. Single values of rock strength vary from 2.53 to 175.25 MPa. Despite the wide range of random spatial variations, there is a stable interlithogenic proximity of the average median strength of the rocks, equal to 42.46–047.57 MPa. The exception is dolomites and limestones, which lie deep under Quaternary deposits at the transition between the Leno-Aldan plateau and the Central Yakut Plain. Here the average rock strength decreases to 26.15–36.66 MPa. According to statistics, in Southern Yakutia, in almost 80% of cases there are rocky sedimentary rocks that, according to the engineering-geological classification, belong to the medium-strong categories (15–120 MPa). The general average median and modal values of rock strength, equal to 46.00 and 42.70 MPa, are considered as an initial and previously unknown assessment of the regional background strength of sedimentary rocks within the studied part of South Yakutia.

Keywords: Southern Yakutia, sedimentary rocks, sandstone, dolomite, limestone, strength of air-dry and water-saturated rocks, local and regional strength background, engineering-geological categories of rock strength.