

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №3, Том 14 / 2022, No 3, Vol 14 <https://esj.today/issue-3-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/01NZVN322.pdf>

DOI: 10.15862/01NZVN322 (<https://doi.org/10.15862/01NZVN322>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нерадовский, Л. Г. Скорость распространения сейсмической волны в долине р. Лены Туймааде / Л. Г. Нерадовский // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 3. — URL: <https://esj.today/PDF/01NZVN322.pdf> DOI: 10.15862/01NZVN322

For citation:

Neradovsky L.G. Speed of propagation of a longitudinal refracted seismic wave in the river valley Lena Tuymaade. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(3): 01NZVN322. Available at: <https://esj.today/PDF/01NZVN322.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/01NZVN322

УДК 550.344

Нерадовский Леонид Георгиевич

ФГБУН «Институт мерзлотоведения имени П.И. Мельникова
Сибирского отделения Российской академии наук», Якутск, Россия
Старший научный сотрудник
Доктор технических наук
E-mail: L031950N@ya.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

Скорость распространения сейсмической волны в долине р. Лены Туймааде

Аннотация. Обобщены значения скоростей продольных преломленных волн, полученных в 1979–1999 гг. методом преломленных волн при проведении работ Якутским трестом инженерно-строительных изысканий на застраиваемой территории долины р. Лены Туймаады. Установлен нормальный вероятностный закон пространственного распределения значений скоростей во всех литотипах четвертичных отложений. В криолитозоне Центрально-Якутской равнины в долине Туймааде подтверждён общий закон роста скоростей по глубине в зависимости от роста объёмного веса. Локальные вариации пространственной изменчивости скорости преломленной волны обусловлены совокупным влиянием основных грунтово-мерзлотных факторов: засоленности, льдистости и пористости. Наиболее изменчивой оказалась скорость преломленной волны в глинистых фациях — суглинках и супесях озёрно-болотных отложений. Средняя скорость при равном объёмном весе осадочных пород практически одинакова в долине Туймааде и в криолитозоне Южной Якутии. Такая региональная петрофизическая особенность создаёт благоприятные инженерно-геокриологические условия для применения метода преломленных волн в криолитозоне, как Центральной, так и Южной Якутии для решения одной из важных основных инженерно-геологических задач. А именно, определения глубины залегания полускальных и скальных коренных пород осадочного генезиса в основаниях фундаментов инженерных сооружений. Анализ теоретических вариограмм значений скорости преломленных волн показал, что надёжность вероятностно-статистических решений в распознавании границы между мёрзлой толщей четвертичных отложений и коренными породами в долине Туймааде очень высока и составляет 99,5 %. С максимальной, но небольшой ошибкой 15,5 % распознаётся граница между сезонноталым культурным слоем и суглинисто-супесчаными озёрно-болотными отложениями.

Ключевые слова: долина «Туймаада»; сезонноталый культурный слой; мёрзлые озёрно-болотные и аллювиальные отложения; коренные осадочные породы; объёмный вес; метод преломленных волн; скорость преломленных волн; гистограммы; вероятность

Введение

Среди проблем современного грунтоведения, до сих пор существует, отмеченная В.А. Королёвым проблема петрофизики мёрзлых пород [1]. Она охватывает множество нерешённых задач в области инженерной геологии, мерзлотоведения, грунтоведения и строительной индустрии. В частности, задач изучения геофизических характеристик мёрзлых пород, которые используются, как грунтовые основания фундаментов инженерных сооружений, находясь с ними в сфере механического, теплового и химико-бактериологического взаимодействия в пределах слоя годовых теплооборотов.

Одной из таких характеристик, изучаемой сейсмическим методом преломленных волн (МПВ), является скорость распространения продольных преломленных волн (V_p).

Научно-технических публикаций по МПВ и значениям V_p много. Они весьма разнообразны, как по целям, так и по объектам, предметам исследований. Однако при всём своём множестве и разнообразии все они носят точечный характер эпизодического опыта. При всём желании и приложении усилий автору настоящей статьи не удалось найти ни одной публикации, в которой бы в систематизированном и обобщённом виде освещалась область исследования характеристики V_p мёрзлых четвертичных отложений криолитозоны Якутии. Причём, не отдельной какой-либо частности, например, суглинка или песка, а в целом, охватывая генетические литотипы всей толщи отложений в криолитозоне России.

Цель настоящей статьи, как и предыдущих статей, с результатами применения МПВ и метода вертикального электрического зондирования [2–5], состоит в частичном восполнении отмеченного недостатка применительно к долине р. Лены Туймааде. Географически эта долина, будучи частью Центрально-Якутской низменности, прилегает к ней с востока, а исторически считается важнейшим сакральным древним местом якутского народа. Здесь данные МПВ были получены в 1979–1999 гг.¹

Обобщение значений V_p сделано в расширенном и дополненном виде по литотипам мёрзлой толщи четвертичных отложений и залегающего под ней горизонта коренных пород осадочного генезиса. Такая всегда непростая и сложная во многих отношениях научная задача впервые решена, используя данные МПВ не по одному какому-либо отдельно взятому сейсмическому профилю или нескольким разрозненным профилям, а по совокупности разрозненные между собой точек МПВ, неравномерно расположенных в пределах всей долины Туймаады.

В целом, та часть фактического материала МПВ, которую удалось в своё время проанализировать в архиве Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ)², в той или иной мере охватывала всю долину Туймааду. К большому сожалению, в процессе этой работы в силу разных причин и обстоятельств оказались

¹ Этот период времени был наиболее благоприятным для решения задач петрофизики мёрзлых пород и грунтов комплексом методов наземной геофизики в рамках обязательных на тот период времени опытно-методических работ. По заданию Госстроя РСФСР эти работы выполнялись в криолитозоне Якутии базовым по региону Якутии трестом ЯкутТИСИЗ по программам НПО Стройизыскания и производственно-научного исследовательского института по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС).

² Во время его работы в этом тресте главным геофизиком до 2005 г.

пропущенными недостающие важные данные по топографо-геодезической привязке фактического материала инженерно-геологических изысканий. Из-за их отсутствия автор настоящей статьи уже не раз не смог осуществить своё давнее желание построить и показать план местоположения точек буровых скважин и МПВ с изолиниями или тоновыми изображениями значений V_p .

Цель и метод исследований

Цель научных исследований, как уже выше было сказано, состояла в обобщении результатов МПВ, полученных в прошлом веке. Объектом исследований была обширная долина Туймаада. Предметом исследования служили вероятностные закономерности и локальные особенности изменчивости значений V_p литотипов слоёв мёрзлой толщи четвертичных отложений и коренных пород осадочного генезиса.

Физические основы МПВ, а также методики измерений, математической обработки и геологической интерпретации результатов, получаемых этим методом, подробно изложены в учебниках по сейсморазведке, например, в учебнике А.М. Епинатьевой³ и в большом количестве научно-технической литературы. Поэтому в настоящей статье эти вопросы рассматривать излишне.

Стремительное развитие и широкое применение МПВ получил в 1929–1960 гг. при поисках и разведке месторождений нефти и газа сначала за рубежом, а затем и в нашей стране, бывшей в тот период времени Союзом Советских Социалистических Республик (СССР). С интересной познавательной историей развития МПВ можно ознакомиться в работе Т.Д. Ильина [6], а также в работе Р. Шериффа и Л. Гелдарта [7].

МПВ выполнялся по методике, специально разработанной для инженерно-строительных изысканий⁴. Изучались только продольные волны. Такая ограниченность и неполнота исследований объясняется организационными и техническими трудностями, связанных в прошлом веке с возбуждением и приёмом поперечных волн.

В начальный период⁵ изучения долины Туймаады работы МПВ производились портативной 2-х и 3-х канальной аппаратурой СМПВ-2 и СНЦ-3 с цифровой регистрацией сейсмических сигналов. Аппаратура выпускалась НПО Сибцветметавтоматика в г. Красноярске и НПО Рудгеофизика в г. Ленинграде. Запись осциллограмм волн выполнялась путём прожига на термобумагу. С появлением передвижной сейсмостанции Поиск-1-6/12-АСМ-ОВ (Геофизприбор, г. Уфа) запись волн выполнялась на 12 каналах гальванометрическим способом на фотобумагу. При необходимости осуществлялась 6-ти канальная запись на магнитную ленту.

В завершающий период производственных исследований в 90-х годах прошлого века работы МПВ выполнялись современной на тот период времени и удостоенной многих наград на выставках в странах СЭВ⁶ переносной шестиканальной аппаратурой Талгар-6 с цифровой регистрацией сейсмических сигналов и одновременно аналоговой записью осциллограмм

³ Епинатьева А.М., Голошубин Г.М., Литвин А.Л., Павленкин А.Д., Петрашень Г.И., Старобинец А.Е., Шнеерсон Н.Б. Метод преломленных волн / под ред. А.М. Епинатьевой. — М.: Недра, 1990. — 297 с.

⁴ Курандин Н.П., Шемшурин В.А., Бондарев В.И., Назаров Г.Н., Миндель И.Г. Инструкция по применению сейсморазведки в инженерных изысканиях для строительства. РСН 45-77. — М.: Госстрой РСФСР, 1977. — 156 с.

⁵ В конце 70-х годов прошлого века.

⁶ Страны экономической взаимопомощи.

продольных волн на термобумагу. Аппаратура выпускалась НПО Рудгеофизика и заводом Казгеофизприбор в г. Алма-Ата.

На рекогносцировочной стадии и начальных стадиях инженерно-геологических изысканий МПВ выполнялся в отдельных точках между скважинами по системе одиночных годографов с расстоянием между точками сейсмических зондирований от 100 до 200 м. На детальных стадиях изысканий применялась система встречных годографов с расстоянием между точками сейсмического профилирования от 10 до 50 м.

Длина одиночной расстановки сейсмоприёмников не превышала 200 м. Расстояние между сейсмоприёмниками было неравномерным. Возле источника возбуждения расстояние было равным 2 м, а по мере удаления от него увеличивалось до 5–10 м. При работе с сейсмостанцией Поиск-1-6/12-АСМ-ОВ возбуждение волн осуществлялось с поверхности земли передвижной ударной установкой с весом падающего груза около 80 кг. При работе с портативно-переносной аппаратурой волны возбуждалась ударом обычной кувалды с различным числом накопления сейсмического сигнала. В зависимости от поверхностных и иных условий точка ударного возбуждения волны находилась от первого сейсмоприёмника на расстоянии от 3–5 до 10–20 м.

Вычисление кажущихся значений V_p выполнялось по линейным участкам годографов с разным углом наклона и представляло собой элементарную операцию в виде отношения значений расстояния к значению времени прихода первого вступления волны, т. е. того расстояния, которое соответствовало этому времени. Погрешность вычисления значений V_p не превышала 15 % и оценивалась косвенным путём по результатам полевого внутреннего контроля ошибки визуальных измерений на осциллограммах времени начала прихода преломленной волны. Определение глубины залегания геологических границ выполнялось наиболее простым и понятным способом t_0 в допущении предположения, что в окрестности точек сейсмических зондирований эти границы имеют ровную поверхность и представляют собой горизонтально-слоистую систему. Такое допущение, хотя и не во всех случаях, но в целом, соблюдается при изучении генетически горизонтально-слоистых мёрзлых осадочных толщ четвертичных отложений.

Стоит заметить, что в ведомственной инструкции по сейсморазведке (РСН 45-77), а также литературе по инженерной сейсморазведке, например, в работах Н.Н. Горяинова, Ф.М. Ляховицкого [8] и В.Н. Никитина [9] не употребляется словосочетание «кажущаяся скорость». Довольствуются только термином «скорость». Такая неточность создаёт смысловую неопределённость и может привести в заблуждение неопытных молодых геофизиков. В том смысле, что МПВ определяется послойные скорости, тогда, как этим методом в отличие от метода отражённых волн их определить невозможно. Тем не менее, и об этом свидетельствует многолетний опыт применения МПВ, знание кажущихся скоростей преломленных волн не менее ценно чем знание послойных скоростей, получаемое, например, методом акустического каротажа в скважинах. Хотя бы потому, что эта волновая характеристика даёт по каждому слою геологического разреза интегральное представление не в вертикальном, а в горизонтальном направлении об итоговом результате латеральной изменчивости состава, свойств и состояния грунтово-геологической среды в окрестности точек сейсмического зондирования. То есть в интервале распространения скользящего фронта преломленной волны по границе раздела слоёв грунтово-геологической среды.

Район исследований

Работы МПВ выполнялись в летне-осенний период времени в долине Туймааде, где расположен г. Якутск и прилегающие к нему посёлки Табага, Жатай, Кангалассы вместе с сёлами Хатассы, Марха, Сырдах, Тулагино, Кильдямцы. Долина занимает расширенную левобережную часть р. Лены в среднем её течении и расположена между Табагинским мысом (на юге) и Кангаласским мысом (на севере). Протяжённость долины между мысами достигает 70 км при максимальной ширине между левым и правым берегом в Якутском секторе⁷ до 11–15 км.

В геоморфологическом отношении долина Туймаада состоит из низкой, высокой поймы и двух низких надпойменных голоценовых террас: Якутской и Сергелляхской. Такая, ставшая привычной и принятая геологами-съёмщиками и геологами изыскательских трестов геоморфологическая классификация долины Туймаады, построена главным образом, на представлениях П.А. Соловьёва и С.С. Коржуева [10; 11]. Однако есть и другой более современный взгляд на геоморфологическое строение долины Туймаады, основанный на результатах детальных исследований стратиграфии её аллювия [12]. По этим данным долина Туймаада представлена одной безымянной разновысотной надпойменной дриас-голоценовой террасой, денудационно-аккумулятивная поверхность которой отличается сложным строением микрорельефа и широко развитой гидрографической сетью (стариц, проток, озёр).

Пойма долины Туймаады не застроена. Исключение составляет часть высокой поймы около г. Якутска, называемая местным населением «Зелёный Луг». Здесь в качестве проектно-строительного эксперимента инженерные сооружения новых жилых микрорайонов 202 и 203 построены на искусственно возведенной промерзающей толще песчаных грунтов, намытых гидромеханическим способом из русла речных протоков. Мощность, слагающих долину Туймааду, мёрзлых четвертичных отложений в целом возрастает до 20–25 м в направлении от русла р. Лены к выходу на дневную поверхность её коренного основания⁸, сложенного осадочными породами юрского возраста.

По данным буровых и геофизических работ коренные осадочные породы в долине Туймааде залегают, чаще всего, на глубине 17–27 м. Ближе всего к дневной поверхности осадочные породы находятся в пойме «Зелёный Луг». Здесь коренные осадочные породы вскрыты большим количеством изыскательских скважин на глубине от 7,4 до 18,8 м при среднем значении 12,5–13,4 м⁹.

По сложившимся геологическим представлениям поверхность кровли выветренных коренных осадочных пород имеет выровненную корытообразную форму. На участках глубоких водоёмов (проток, озёр) кровля коренных пород погружается до 30–40 м и возможно ещё глубже. Одно из таких углублений было обнаружено на 1-ой надпойменной террасе Якутской в районе села Кильдямцы и детально изучено учёными Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН. Такие особенности морфологии кровли коренных пород с непредсказуемыми её локальными погружениями учёные ИМЗ СО РАН [13, с. 197] рассматривают, как и разобщённые между собой локальные депрессивные впадины, возникшие

⁷ В районе застроенной территории г. Якутска.

⁸ В виде крутого уступа эрозионной поверхности Приленского плато или иначе называемой Мыранновой гряды высотой над долиной «Туймадой» 100–120 м.

⁹ Технический отчет по геофизическим работам на объекте «Изыскания в русле и на пойме р. Лена у г. Якутска с целью гидролого-морфологического обоснования влияния русловых деформаций на застройку территории «Зеленого Луга». — Якутск: Архив ЯкутГИСИЗ, 1990. Шифр-2187. Инв. № 3934. — 44 с.

при сбросе левобережной части коренного основания долины Туймаады по крупному тектоническому разлому называемому Якутским.

Мощность вечной мерзлоты в долине Туймааде в среднем значении равна 250–300 м, уменьшаясь до 100–150 м в пойменной части. По обобщению данных термометрии изыскательских скважин за 1976–2011 гг. в природных условиях с не нарушенным или слабо нарушенным нулевым тепловым балансом в слое годовых теплооборотов температура мёрзлых четвертичных отложений в южной и северной части долины Туймаады на глубине 10–15 м изменяется от $-1,7$ до $-2,8^{\circ}\text{C}$ при среднем значении $-2,2^{\circ}\text{C}$. В г. Якутске и его окрестностях, где тепловой баланс мёрзлых четвертичных отложений с давних пор нарушен действием сначала антропогенных, а в современный период времени и техногенных факторов, изменчивость температуры по площади стала больше, но средний её фоновый показатель почти не изменился. Температура на в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине 10–15 м изменялась от $-11,0$ до $7,0^{\circ}\text{C}$ при средних значениях $-(2,3\div 2,7)^{\circ}\text{C}$ [14].

По данным ЯкутГИСИЗ обобщенный инженерно-геологический разрез долины Туймаады имеет следующее строение:

1 слой. Сезоннотальный культурный слой (кирпичи, известь, навоз, опилки и прочий мусор прошлого и настоящего времени). Мощность слоя изменяется от 0,4 до 3,7 м при среднем значении 1,5 м.

2 слой. Мёрзлые засоленные глинистые грунты (суглинки и супеси) со слоисто-сетчатой криогенной структурой. Мощность слоя изменяется от 1,2 до 4,1 м при среднем значении 2,6 м. Глубина залегания подошвы слоя в среднем равна 4,1 м.

3 слой. Мёрзлые нельдистые пески с массивной криогенной структурой (пылеватые, мелко-среднезернистые и крупнозернистые)¹⁰. Пылеватые пески в разной степени засолены и содержат в рассеянном или сконцентрированном виде примеси органики и детритов. Мощность слоя изменяется от 8,7 до 16,2 м при среднем значении 14,7 м. Глубина залегания подошвы слоя в среднем равна 18,8 м.

4 слой. Мёрзлые крупнообломочные грунты (гравий, галька) с примесью песков. Мощность слоя изменяется от 0,7 до 4,2 м при среднем значении 2,7 м. Глубина залегания подошвы слоя в среднем равна 21,2 м.

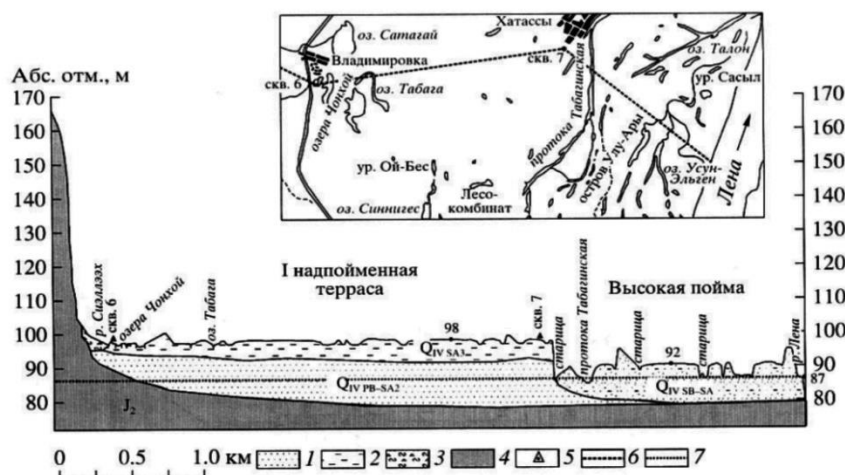
5 слой. Коренное основание долины «Туймаады» сложенное мёрзлыми осадочными породами средней юры (преимущественно песчаниками), залегающими на глубине от 7,4 до 28,7 м при среднем значении 21,2 м.

Таким образом, начиная с глубины около 3–4 м, преломленные волны распространялись в механически прочных твёрдомёрзлых нельдистых и преимущественно незасоленных мелко-среднезернистых песках. Этот факт, является одной из важных петрографических особенностей распространения не только преломленных, но и других упругих сейсмических волн в мёрзлой толще четвертичных отложений долины Туймаады.

Иллюстрация строения долины Туймаады в южной её части между г. Якутском и пос. Табага показана на рисунке 1. Рисунок заимствован из работы Спектра В.В. и др. [12] с разрешения авторов работы. Во избежание путаницы стоит заметить, что по линии геолого-геоморфологического разреза, показанного на рисунке 1, работы МПВ не проводились. Тем не менее, некоторые точки сейсмических зондирований могли оказаться в окрестности или даже,

¹⁰ Пески русловой фации встречаются в разрезе буровых скважин с вероятностью 73 % с преобладанием мелкозернистой фракции (37 %). Крупнозернистые пески встречаются редко с вероятностью около 2 % [15].

на самой линии разреза. Показать местоположение этих точек на картографической основе не представляется возможным по причине, указанной в разделе «Введение».



1 — пески; 2 — алевриты; 3 — склоновые отложения; 4 — юрские песчаники и алевриты; 5 — скважины; 6 — линия разреза на схеме-врезке; 7 — меженный уровень р. Лены. Индексы: QIV SA3 — голоцен, поздняя субатлантика; QIV PB-SA2 — голоцен, предбореал-средняя субатлантика; Q IV PB-SA — голоцен, суббореал-субатлантика; J2 — юрские отложения

Рисунок 1. Геолого-геоморфологический разрез долины р. Лены «Туймаада» (составлено В.В. Спектром и др. [12])

Фактический материал

В целом, собранный для статистического анализа фактический материал МПВ, представлял собой выборочную совокупность из 1367 изыскательских и частично гидрогеологических скважин Якутской поисково-съёмочной экспедиции (ЯПСЭ), на которых были выполнены параметрические определения значений V_p . Из этого числа только 200 скважин были пройдены до коренных пород и установили глубину их залегания. Изыскательские скважины в большом количестве бурились до глубины 10–15 м на множестве площадок будущего строительства инженерных сооружений промышленно-гражданского и сельскохозяйственного назначения. Не так часто скважины бурились до глубины 3–5 м по трассам линейных сооружений (ЛЭП, газопроводов, водоводов и пр.). Для изучения теплового режима в слое годовых теплооборотов и общего геологического строения застраиваемой территории почти на каждом объекте изысканий бурились 1–3 опорные режимные и структурные скважины до глубины залегания коренных осадочных пород, вскрывая всю мёрзлую толщу четвертичных отложений до глубины 20–30 м и реже, до 50 м. Проходка каждой скважины сопровождалась отбором проб отложений из керна скважин на лабораторное определение физико-механических свойств. После этого через 10–15 дней после тепловой выстойки скважин в них выполнялась термометрия с измерением температуры отложений ртутными термометрами или терморезисторами. К сожалению, эти драгоценные сведения автор настоящей статьи не смог использовать по назначению¹¹ из-за полной потери доступа к архиву ЯкутГИСИЗ после его банкротства в конце 2014 г.

¹¹ С целью изучения статистической зависимости значений V_p с такими важнейшими показателями физических свойств мёрзлых четвертичных отложений, как объёмный вес (плотность), влажность (льדיстость), засоленность и температура.

Кроме этого, из-за отсутствия доступа к первичной полевой документации МПВ в статье не приведены графики частных годографов по отдельным геоморфологическим элементам долины Туймаады и график общего годографа по всей долине, которые могли бы быть интересными и полезными любопытным читателям.

Обсуждение результатов статистического анализа

Из множества методов математической статистики и теории вероятности для статистического анализа вероятностной изменчивости значений V_p были применены всего лишь, два простейших метода¹² с использованием программы «Стадия» [16]. Результат применения первого метода представлен в таблице. Результат применения второго метода показан в виде графиков общей и сводной гистограмм, построенных по исходной выборочной совокупности, состоящей из 5699 значений V_p (рис. 2).

Графики гистограмм со всей очевидностью показывают устойчивость пространственного вероятностного распределения значений скоростной характеристики в долине Туймааде. Эта весьма важная черта, сохраняется, несмотря на специально заданные разные варианты обобщения с противоположными подходами изучения исходной выборочной совокупности. Меняются только случайные детали в частных особенностях распределений. Однако, в целом мультимодальная структура значений V_p сохраняет свою вероятностную композицию, состоящую из пяти обособленных групп с чётко разрешёнными модами, т. е. наиболее часто встречающимися значениями V_p .

Такая закономерная дифференциация в полном соответствии с действием теоретического закона нормального вероятностного распределения значений физических величин, конечно же, обусловлена разным составом и свойствами мёрзлых четвертичных отложений и коренных пород.

Таблица

Скорость преломленной волны в долине Туймааде

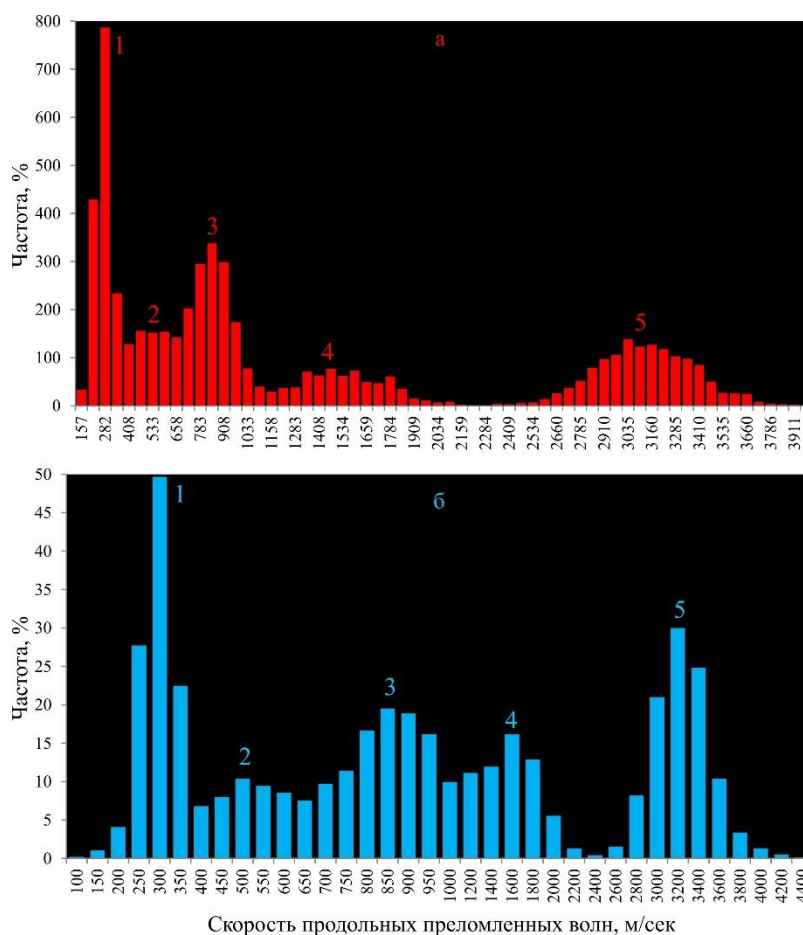
Описательная статистика	Значения V_p , м/сек				
	1	2	3	4	5
Среднее арифметическое значение (САР)	267	510	853	1518	3130
Среднее медианное значение	269	508	852	1516	3124
Среднее модальное значение (мода)	265	719	1016	1966	3227
Стандартное среднеквадратичное отклонение	39,3	122,4	95,7	261,3	259,7
Коэффициент вариации, %	14,7	24,0	11,2	17,2	8,3
Минимальное значение	154	150	666	760	2221
Максимальное значение	711	880	1864	2295	4505
Количество определений	1367	864	1367	734	200
Уровень доверительной вероятности САР (95,0 %)	2,1	6,5	5,2	13,7	13,6

Примечания: 1 — сезонноталый культурный слой; 2 — суглинки, супеси озёрно-болотных отложений; 3 и 4 — пески и гравий, галька аллювиальных отложений; 5 — коренные осадочные породы. Составлено автором

В рассматриваемом случае этот фундаментальный закон природы, принятый за основу в математической статистике и теории вероятности [17] свидетельствует о том, что результат уравнивания непредсказуемого сочетания множества разнонаправленных факторов, действующих на изменчивость значений V_p в долине Туймааде, обусловлен действием не антропогенно-техногенных факторов, а доминирующих природных мерзлотно-грунтовых факторов. Из этого следует, что характеристики вероятностного распределения значений V_p

¹² Метод вычисления описательных статистик и метод гистограммного анализа.

литотипов мёрзлых четвертичных отложений и горизонта коренных пород (табл.) получены, так сказать, в чистом виде. Под этим следует понимать, что в масштабе всей долины Туймаады вероятностное распределение значений V_p не искажено влиянием не только антропогенно-техногенных факторов, но и климатического фактора¹³.



Максимумы (моды) наиболее часто встречаемых значений скоростей в групповых выборках по слоям инженерно-геологического разреза: 1 — сезоннотальный культурный слой; 2 — мёрзлые глинистые разности озёрно-болотных отложений; 3 — мёрзлые песчаные разности аллювиальных отложений; 4 — мёрзлые крупнообломочные разности аллювиальных отложения (гравий, галька с примесью песка); 5 — мёрзлые коренные осадочные породы

Рисунок 2. Сводная гистограмма значений скорости преломленных волн в долине Туймааде. Объём выборки — 5699 определений (составлено автором)

Рассмотрим изменчивость значений V_p в долине Туймааде, начиная от сезоннотального культурного слоя и завершая горизонтом коренных осадочных пород.

Сезоннотальный культурный слой

Слой отличается разным генезисом, неоднородным составом и сильной изменчивостью свойств по латерали. Несмотря на это значения V_p по коэффициенту вариации в этом слое при мощности более одного метра и порой достигая 5 м [19] изменяются незначительно, не превышая 15 %. При средних показателях 265–269 м/сек значения V_p с вероятностью 70 % сосредоточены в интервале 228–306 м/сек.

¹³ Начавшегося в Якутии в 1976 г. быстрого роста среднегодовой температуры приземного воздуха [18] и связанного с этим роста температуры мёрзлых четвертичных отложений в слое годовых теплооборотов.

Подгруппы относительно высоких (выше 350 м/сек) и низких (ниже 200 м/сек) значений V_p встречаются в сезонноталом культурном слое с вероятностью 1,5–3,0 %. Природа высокой скорости обусловлена уплотнением или, напротив, разрыхлением слоя на застроенной территории населённых пунктов. Природа низкой скорости объясняется разной степенью увлажнения и засоления талых грунтов с образованием на границе с мёрзлой толщей надмерзлотных криопёгов.

Слой мёрзлых глинистых отложений озёрно-болотного генезиса

Слой почти повсеместно распространён на 1-ой надпойменной Якутской террасе долины Туймаады. В пойме долины слой встречается редко. Отложения представлены глинистыми разностями в разной степени засоленных, заторфованных льдистых суглинков и супесей со шпировой криогенной текстурой. Значения V_p слоя сосредоточены в окрестности средних показателей 508–719 м/сек.

При более высокой изменчивости с коэффициентом вариации 24 % по отношению к сезонноталому культурному слою значения V_p с вероятностью 70 % распределены в интервале 388–632 м/сек. Высокие значения V_p встречаются с вероятностью 6,3 % в случаях преобладания по мощности слоя супесей над слоем суглинков или снижения в них содержания органики (ила, торфа) и детрита. Напротив, преобладание суглинков над супесями вместе с ростом содержания органических веществ и/или текстурного льда приводит к снижению объёмного веса (плотности) и через него, к снижению значений V_p .

Незначительная вероятность событий (около двух процентов) с низкими значениями V_p свидетельствует о том, что в природной обстановке на большей части долины Туймаады слой озёрно-болотных отложений представлен слабозасоленными супесями и суглинками.

Слой мёрзлых песчаных аллювиальных отложений

Это самый большой по площади распространения и глубине слой четвертичных отложений. Слой представлен преимущественно мелко-среднезернистыми песками. На дневную поверхность слой выходит в русловой и низкой пойменной части долины. Реже слой встречается на возвышенных участках 2-ой надпойменной Сергелляхской террасы. Значения V_p в слое изменяются от 670 до 1860 м/сек. и сосредоточены возле средних показателей 852–1016 м/сек. С вероятностью 70 % значения V_p распределены в интервале 757–949 м/сек. По коэффициенту вариации изменчивость значений V_p в песках в сравнении с изменчивостью в супесях и суглинках меньше и равна 11,2 %. Отмеченная особенность указывает на более однородное строение и меньшую изменчивость температуры и свойств¹⁴ песчаной фации аллювия четвертичных отложений.

Нормальное вероятностное распределение значений V_p в аллювиальных песках слегка осложняется обособленно расположенной группой значений выше 1100 м/сек. Вероятность их встречи равна 2,3 %. Причиной повышения скорости является явное преобладание над пылеватыми фракциями песков хорошо отсортированных фракций мелко-среднезернистых песков с массивной криогенной текстурой и более высоким объёмным весом (плотностью). В такой однородной среде, как правило отсутствуют примеси органики и детритов. В редких случаях с вероятностью около 2 %, когда в песчаном слое преобладают

¹⁴ Прежде всего, объёмного веса и пористости.

пылевато-мелкозернистые фракции песков с примесями органики и детрита, скорость становится меньше 670 м/сек.

Слой мёрзлых крупнообломочных аллювиальных отложений

Слой является базальным, разделяющим толщу четвертичных отложений от горизонта коренных осадочных пород. Слой не везде прослеживается и вскрыт бурением опорных режимно-структурных скважин в разных местах долины Туймаады. Слой представляет собой в разной мере отсортированные галечники и гравий с примесью песков. При средних показателях 1519–1966 м/сек значения V_p в слое изменяются от 760 до 2295 м/сек. Изменчивость скорости по коэффициенту вариации выше на 42,2 % в сравнении с более однородным по строению и свойствам вышележащим слоем песков.

В 70 % случаев значения скорости сосредоточены в интервале 1257–1779 м/сек. Высокие значения (более 2000 м/сек.) составляют 1,9 % от всего объёма выборочной совокупности. Такая же доля приходится на сравнительно низкие значения (менее 1000 м/сек.). Смещение скорости в сторону высоких значений обычно происходит в случае плотной упаковки хорошо отсортированного по латерали крупнообломочного материала без примесей песков. В случаях присутствия льдистых образований, разрыхляющих слой галечников и гравия, скорость снижается. Такая закономерность даёт возможность сравнительно быстро и экономично решать задачу инженерно-геологического районирования нижней части инженерно-геологического разреза долины Туймаады по категории льдистости крупнообломочных отложений. Принимая во внимание современные тенденции с расширением площади застройки г. Якутска и его окрестностей вместе с ростом стоимости земельных угодий, такая возможность в ближайшей перспективе с большой вероятностью может оказаться востребованной. В особенности при проектировании многоэтажных жилых и особо ответственных сооружений с заложением свайных фундаментов инженерных сооружений ниже глубины 10–15 м, где в сферу механического взаимодействия инженерных сооружений с мёрзлой толщей четвертичных отложений начинает вовлекаться горизонт коренных осадочных пород.

Горизонт мёрзлых коренных осадочных пород

Слой представлен преимущественно песчаником якутской свиты средней юры. В подчинённом к нему отношении находятся алевролиты и другие не до конца литифицированные осадочные породы. По данным С.Б. Петрова и Л.Н. Безрук¹⁵ песчаник представляет собой плотные светло-серые мелко-среднезернистые и реже, крупнозернистые слабосцементированные образования с включениями обуглившейся древесины, примесью рыхлых алевролитов и тонкими прослойками гидрослюдистых глин.

Значения V_p в коренных породах достигают максимальных значений по отношению к мёрзлой толще четвертичных отложений. При изменчивости единичных значений от 2221 до 4505 м/сек. средние показатели равны 3120–3230 м/сек. С вероятностью 70 % значения V_p сосредоточены в узком интервале 2870–3390 м/сек., отражая по коэффициенту вариации минимальную степень скоростной изменчивости равную 8,3 %. Такая вариативная особенность, как и в случае аллювиальных песков, служит убедительным доказательством

¹⁵ Петров С.Б., Безрук Л.Н. Отчет по изучению, детальному картированию и прогнозированию развития экзогенных геологических процессов на территории Большого Якутска в 1983–1985 гг. Том I (текст отчета). — Якутск: ПГО Якутскгеология. Инв. № 6848. 223 с.

латеральной однородности состава и физических свойств коренных пород в пределах долины Туймаады.

Наиболее плотные литифицированные разности песчаника характеризуются высокими значениями V_p (более 3640 м/сек.) и встречаются редко. В выборочной совокупности фактического материала их доля составляет 2,4 %. Ещё меньше доля сравнительно низких значений V_p (менее 2630 м/сек.) равная 1,5 %. С такой незначительной вероятностью в долине Туймааде встречаются генетически рыхлые крупнозернистые песчаники с пониженным объёмным весом (плотностью) вместе с включениями органики, примесей алевритов и прослоек глин. Аналогичный эффект плотностного снижения скорости наблюдается при полном замещении песчаника алевролитом и алевритом.

Перейдём от частного к общему.

Рассмотрим изменчивость по глубине средних значений V_p в зависимости от средних значений объёмного веса (плотности) пяти основных литотипов долины Туймаады.

График изменчивости, построен с соблюдением правила равного масштаба¹⁶ (рис. 3). На этом рисунке средние значения скорости, заключённые с вероятностью 70 % в полосе верхней и нижней границ доверительного интервала, выстраиваются в упорядоченную цепочку роста в зависимости от роста средних значений объёмного веса (плотности) от 1,7 до 2,4 г/см³. В этой петрофизической закономерности на первый взгляд нет ничего нового в сравнении с давно известным общим законом нарастания по глубине скорости преломленных волн в осадочных образованиях с присущим им гравитационным ростом объёмного веса (плотности) по глубине. Однако в конкретно-предметном выражении научная новизна рассматриваемой закономерности выражает себя в ранее неизвестной в криолитозоне Центрально-Якутской низменности обобщённой физико-геокриологической скоростной модели долины Туймаады. Практический аспект применимости модели вместе с объективной её достоверностью усиливаются тем, что она обнаруживает в себе черты регионального характера.

В качестве доказательства достаточно сослаться на работу Н.Н. Горяинова. В ней есть таблица скоростей¹⁷ продольных преломленных волн в мёрзлых глинисто-песчаных отложениях, галечниках и песчанике при температуре -3,0°C [21, с. 13]. Эти значения получены в результате обобщения результатов работ МПВ, выполненных в прошлом веке разными организациями по гидротехническим сооружениям. График изменчивости обобщённых значений скорости преломленной волны, построенный по данным Н.Н. Горяинова и привязанный к строению долины Туймаады, показан на рисунке 3в.

При соблюдении общего закона роста с глубиной скорости преломленной волны в криолитозоне Центральной Якутии и за её пределами, отмечается различие в форме инверсии (не роста, а снижения) скорости в песчанике со стороны минимальных значений. Другое региональное различие наблюдается в более высоких значениях V_p по данным Н.Н. Горяинова. При практических равных температурах (около -3,0°C) существенную разницу в скоростях можно объяснить более высокой плотностью мёрзлых четвертичных отложений и коренных

¹⁶ Согласно этого правила сравниваются между собой обобщённые средние значения V_p и такие же обобщённые значения объёмного веса (плотности). Так как эти значения невозможно было получить из-за отсутствия данных по лабораторному определению плотности в изыскательских скважинах, то вместо них были взяты обобщённые значения плотности по данным И.Н. Вотякова [20, с. 18]. Их он получил на территории Центрально-Якутской низменности, геоморфологической частью которой является долина Туймаада.

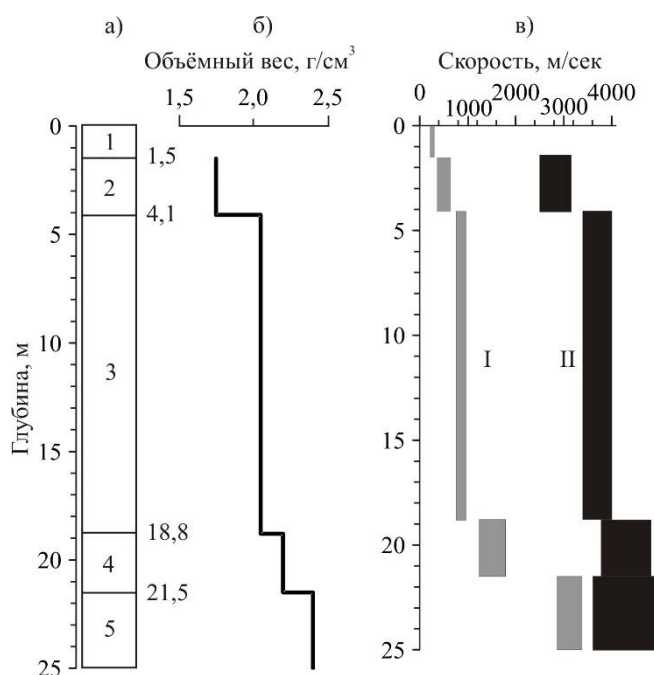
¹⁷ Неизвестно каких значений: минимально-максимальных или наиболее часто встречаемых в выборочной совокупности при заданной вероятности.

пород за пределами Якутии. Настоящая же причина высоких скоростей в работе Н.Н. Горяинова не рассматривается.

В центральной и южной части криолитозоны Якутии средние значения V_p мёрзлого песчаника близки между собой. В Алдано-Чульманском районе в песчанике с плотностью 2,56–2,58 г/см³, залегающем под слоем делювия-элювия на глубине около 30 м, среднее значение скорости равно около 4000 м/сек. [22, с. 93]. В долине Туймааде, где песчаник со средней плотностью 2,40 г/см³ залегает под толщей мёрзлых четвертичных отложений в среднем на глубине 21,2 м среднее значение скорости равно около 3000 м/с.

Относительная разница в средних скоростях в разных местах криолитозоны Якутии составляет около 30 %.

При коррекции средней плотности к одному значению, например, к значению 2,40 г/см³ для условий Центрально-Якутской низменности, относительная разница в значениях кажущейся скорости преломленной волны уменьшается на 8 %. Из этого следует, что при равной плотности песчаника в криолитозоне Центральной и Южной Якутии кажущиеся скорости распространения в них преломленных волн будут мало отличаться друг от друга. И наоборот, при равенстве скоростей волн в этих областях Якутии следует ожидать равные плотности мёрзлого массива песчаника.



1 — сезонноталый культурный слой; 2 — мёрзлые глинистые разности озёрно-болотных отложений; 3 — мёрзлые песчаные разности аллювиальных отложений; 4 — мёрзлые крупнообломочные отложения (гравий, галька); 5 — мёрзлые осадочные породы

Рисунок 3. Графики дискретных значений скорости распространения преломленной волны в четвертичных отложениях долины Туймаады: а — сводная литологическая колонка инженерно-геологического разреза; б — график послойных значений объёмного веса (плотности) отложений; в — графики пределов послойной изменчивости скорости волн в долине «Туймааде» (I) и за пределами криолитозоны Якутии (II) по данным Н.Н. Горяинова [21] (составлено автором)

Осталось рассмотреть общую для всей мёрзлой толщи четвертичных отложений и коренных осадочных пород пространственную динамику значений V_p в субширотном направлении — от поймы долины к надпойменным террасам: Якутской и Сергелляхской. Для решения этой задачи выполним в общей выборочной совокупности сортировку значений V_p с

образованием групп по отмеченным геоморфологическим элементам. Ограничимся вычислением в группах только среднего медианного значения, так как эта универсальная статистика центра тяжести любого типа вероятностного распределения в отличие от других средних показателей наиболее устойчива к влиянию искажений со стороны минимальных и максимальных значений на концах распределений.

Результат вычислений показан на рисунке 4. Представленные на нём графики свидетельствуют о почти одинаковом изменении в субширотном направлении средней скорости. В мёрзлой толще четвертичных отложений скорость нелинейно увеличивается от 822 до 2077 м/сек. В коренных породах скорость сначала немного уменьшается от 3074 до 2847 м/сек. при переходе из поймы на первую надпойменную Якутскую террасу, а затем возрастает до 3641 м/сек. при дальнейшем переходе на более высокую вторую Сергелляхскую террасу.

В целом, относительный скоростной контраст между мёрзлой толщей четвертичных отложений и мёрзлым горизонтом коренных пород уменьшается в поперечном направлении долины Туймаады. В пойменной части долины скоростной контраст имеет максимальное значение 115,6 %, облегчая решение задачи визуального распознавания на годографах МПВ точки начала первого вступления преломленной волны на опорной структурной границе четвертичные отложения — коренные породы и вместе с тем, повышая точность определения глубины залегания этой границы. Благоприятные условия для решения этих задач сохраняются и на надпойменных террасах, несмотря на снижение скоростного контраста от 96,9 % (Якутская терраса) до 54,7 % (Сергелляхская терраса).



Код геоморфологического элемента: 1 — пойменная часть долины; 2 — первая Якутская надпойменная терраса; 3 — вторая Сергелляхская надпойменная терраса

Рисунок 4. Графики субширотной изменчивости в долине «Туймааде» средних значений кажущихся скоростей продольных преломленных волн в мёрзлой толще четвертичных отложений и коренных породах осадочного генезиса (составлено автором)

Закономерный рост скорости в четвертичных отложениях находит объяснение в обобщении результатов инженерно-геологических исследований, сделанного Ф.Е. Попенко по лабораторным данным физико-механических свойств мёрзлых грунтов, слагающих верхнюю часть долины Туймаады до глубины 10–15 м [23].

По результатам этого обобщения субширотный геоморфологический переход сопровождается ростом объёмного веса (плотности) аллювиальных песков, которые, напомним, в толще мёрзлых четвертичных отложений имеют преимущественное распространение и по площади, и по глубине. В этом общем переходе мелкозернистые пески Якутской террасы сменяются более древними среднезернистыми песками Сергелляхской

террасы с закономерным снижением средних показателей суммарной влажности, пористости и роста плотности минерального скелета. Эта тенденция по показателю длительного эквивалентного сцепления находит своё количественное выражение в большей прочности среднезернистых песков Сергелляхской террасы.

Заключение

Подводя итог рассмотрению результатов вероятностно-статистического анализа значений V_p нельзя обойти молчанием важный и редко решаемый вопрос о надёжности распознавания границ слоёв техногенно-геологических образований. Точное решение этого вопроса достигается путём определения ошибок статистических решений 1-го и 2-го рода по теоретическим вариограммам нормального вероятностного распределения, адекватно аппроксимирующих фактическое гистограммное распределений значений какой-либо физической величины или характеристики. Не вдаваясь в подробное рассмотрение сути обозначенных ошибок и результатов их определений, ограничимся лишь констатацией значений суммарного интеграла вероятности¹⁸ для всех изученных криогенно-литологических границ. Скоростная граница сезонноталого культурного слоя и мёрзлого слоя глинистых разностей, распознаётся с надёжностью 84,5 %. С большей надёжностью, равной 88,4 %, распознаётся граница между мёрзлыми слоями глинистых озёрно-болотных и песчаных фаций аллювиальных отложений. Скоростная граница между мёрзлыми слоями песков и гравия, галечника распознаётся с ещё большей надёжностью, равной 93,0 %. С максимальной надёжностью, равной 99,5 %, т. е. практически безошибочно, распознаётся граница между мёрзлой толщей четвертичных отложений и мёрзлыми коренными осадочными породами. В целом, и это главное, надёжность распознавания границ инженерно-геологического разреза долины Туймаады высока и не опускается ниже 80 %.

Надёжность вероятностно-статистических решений в распознавании скоростных границ усиливается фактом близких значений между выборочной и теоретической оценкой генерального среднего¹⁹ скорости преломленной волны. Разница оценок в границах 95,0 % доверительного интервала изменяется от 2,1 до 13,7 м/сек. (см. нижнюю строку таблицы). При такой небольшой разнице относительная ошибка определения выборочных среднеарифметических оценок V_p литотипов слоёв четвертичных отложений и горизонта коренных осадочных пород варьирует около одного процента. Такая мизерная ошибка с одной стороны обеспечена большим объёмом фактического материала, а с другой стороны — небольшой латеральной изменчивостью скорости в долине Туймааде.

Всё вместе взятое даёт основание использовать полученные значения средней кажущейся скорости преломленной волны, как надёжные априорные оценки при проектировании и постановке работ МПВ в застраиваемой долине Туймааде с целью определения, как глубины залегания коренных осадочных пород, так и не всегда решаемой более сложной задачи — глубины залегания границ основных литотипов слоёв в мёрзлой толще четвертичных отложений.

¹⁸ Суммарный интеграл вероятности ошибок 1-го и 2-го рода представляют собой меру надёжности распознавания геологических объектов по тем или иным характеристикам [24, с. 56]. В частности, распознавания по данным МПВ скоростных границ между литотипами слоёв долины Туймаады.

¹⁹ Математическому ожиданию значений V_p при бесконечном числе определений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Королёв В.А. Актуальные научные проблемы современного грунтоведения // Грунтоведение, 2013. № 1, с. 4–10.
2. Нерадовский Л.Г. Статистика удельного электрического сопротивления мерзлых рыхлых отложений и осадочных пород долины р. Лена «Туймаада» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики, 2019. Т. 24, № 2, с. 49–55.
3. Нерадовский Л.Г. Изучение четвертичных отложений и коренных пород в криолитозоне Центральной Якутии по ретроспективным материалам методом преломленных волн // Геофизика, 2021. № 3, с. 44–55.
4. Нерадовский Л.Г. Опыт изучения методом ВЭЗ геоэлектрического строения долины реки Лены «Туймаада» // Вестник евразийской науки, 2021. — Т. 13. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/25ECVN621.pdf> DOI: 10.15862/25ECVN621.
5. Нерадовский Л.Г. Применение метода вертикального электрического зондирования для расчленения низких надпойменных террас р. Лены в окрестностях г. Якутска // Вестник Евразийской науки, 2022 № 1. — URL: <https://esj.today/PDF/07NZVN122.pdf> DOI: 10.15862/07NZVN122.
6. Ильин Т.Д. Формирование советской школы разведочной геофизики (1917–1941 гг.). — М.: Наука, 1983. — 216 с.
7. Шерифф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка: В 2-х т. Т. 1. История, теория и получение данных. Пер. с англ.– М.: Мир, 1987. — 448 с.
8. Горяинов Н.Н., Ляховицкий Ф.М. Сейсмические методы в инженерной геологии. — М.: Недра, 1979. — 143 с.
9. Никитин В.Н. Основы инженерной сейсмологии. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — 176 с.
10. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. — М.: АН СССР, 1959. — 144 с.
11. Коржуев С.С. Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. — М.: АН СССР, 1959. — 151 с.
12. Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Спектор В.Б. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбое» // Геоморфология, 2008. № 1, с. 87–94.
13. Спектор В.Б., Спектор В.В., Бакулина Н.Т., Торговкин Н.В., Черепанова А.М., Максимов Г.Т., Нерадовский Л.Г. Выступ юрских отложений на днище долины р. Лена // Доклады Академии Наук, 2016. Т. 467. № 2, с. 196–199.
14. Нерадовский Л.Г. Изменение фоновой температуры мерзлых грунтов в Якутске в период потепления климата в Сибири (1976–2011) // Криосфера Земли, 2020. Том XXIV. № 4, с. 46–57. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(46-57).
15. Нерадовский Л.Г. Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии / отв. ред. Г.П. Кузьмин. — Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. — 166 с.
16. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
17. Пасхавер И.С. Закон больших чисел и статистические закономерности. — М.: Статистика, 1974. — 152 с.

18. Скачков Ю.Б. Современные изменения климата Центральной Якутии // Климат и мерзлота: комплексные исследования в Якутии. Якутск, ИМЗ СО РАН, 2000, с. 55–63.
19. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Геохимические особенности техногенных отложений в городе Якутск // Криосфера Земли, 2018. Том XXII. № 3, с. 27–39.
20. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мёрзлых и оттаивающих грунтов Якутии. — Новосибирск: Изд-во Наука, 1975. — 175 с.
21. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии / Министерство геологии СССР; ВСЕГИНГЕО; Под ред. Н.Н. Горяинова. — М.: Недра, 1992. — 264 с.
22. Гриб Н.Н., Самохин А.В. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна. — Новосибирск: Наука, 1999. — 240 с.
23. Степанов А.В., Попенко Ф.Е., Рожин И.И. Основы инженерной защиты объектов строительства в криолитозоне. — Новосибирск: Наука, 2014. — 448 с.
24. Никитин, А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. — М.: Недра, 1979. — 280 с.

Neradovsky Leonid Georgievich

Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

E-mail: L031950N@ya.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=394470

Speed of propagation of a longitudinal refracted seismic wave in the river valley Lena Tuymaade

Abstract. The values of the velocities of longitudinal refracted waves obtained in 1979–1999 are generalized. by the method of refracted waves during the work of the Yakut trust of engineering and construction surveys in the built-up area of the valley of the river. Lena Tuymaada. A normal probabilistic law for the spatial distribution of velocity values in all lithotypes of Quaternary deposits has been established. In the permafrost zone of the Central Yakut Plain in the Tuymaade valley, the general law of the growth of velocities with depth depending on the growth of volumetric weight has been confirmed. Local variations in the spatial variability of the speed of the refracted wave are due to the combined effect of the main ground-frost factors: salinity, ice content and porosity. The most variable was the speed of the refracted wave in clay facies — loams and sandy loams of lacustrine-marsh deposits. The average velocity with an equal volumetric weight of sedimentary rocks is practically the same in the Tuymaade valley and in the permafrost zone of South Yakutia. Such a regional petrophysical feature creates favorable engineering and geocryological conditions for the application of the refracted wave method in the permafrost zone, both in Central and South Yakutia, to solve one of the important basic engineering geological problems. Namely, determining the depth of occurrence of semi-rocky and rocky bedrocks of sedimentary genesis in the bases of the foundations of engineering structures. The analysis of theoretical variograms of refracted wave velocities showed that the reliability of probabilistic-statistical solutions in recognizing the boundary between the frozen strata of Quaternary deposits and bedrock in the Tuymaade valley is very high and amounts to 99.5 %. With a maximum but small error of 15.5 %, the boundary between the seasonally thawed cultural layer and loamy-sandy lacustrine-marsh deposits is recognized.

Keywords: Tuymaada valley; seasonally thawing cultural layer; frozen lacustrine-paludal and alluvial deposits; sedimentary rocks; unit weight; seismic refraction method; refracted wave speed; P-wave velocity; histograms; probability