

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

2021, №6, Том 13 / 2021, No 6, Vol 13 <https://esj.today/issue-6-2021.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/25ECVN621.pdf>

DOI: 10.15862/25ECVN621 (<https://doi.org/10.15862/25ECVN621>)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Нерадовский, Л. Г. Опыт изучения методом ВЭЗ геоэлектрического строения долины реки Лены «Туймаада» / Л. Г. Нерадовский // Вестник евразийской науки. — 2021. — Т. 13. — № 6. — URL: <https://esj.today/PDF/25ECVN621.pdf> DOI: 10.15862/25ECVN621

For citation:

Neradovsky L.G. Experience in VES investigation of resistivity structure of the Tuymaada Valley, middle Lena River. *The Eurasian Scientific Journal*, 13(6): 25ECVN621. Available at: <https://esj.today/PDF/25ECVN621.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.15862/25ECVN621

УДК 550.379

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

Опыт изучения методом ВЭЗ геоэлектрического строения долины реки Лены «Туймаада»

Аннотация. В статье рассмотрен опыт применения в 73–95-х годах прошлого века в инженерно-геологических изысканиях метода вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) на постоянном токе в среднем течении долины р. Лены «Туймаада». Автором впервые изучил по 349 определениям на скважинах вероятностную изменчивость 3-х главных параметров геоэлектрического разреза в южной и северной части долины за пределами г. Якутска. Первый и второй параметр — удельное электрическое сопротивление (УЭС) мёрзлой толщи четвертичных отложений и подстилающих их коренных пород осадочного происхождения. Третий параметр — глубина залегания коренных пород. Значения УЭС четвертичных отложений и глубины залегания коренных пород распределены по нормальному вероятностному закону. Выборочная оценка среднеарифметического значения УЭС четвертичных отложений с доверительной вероятностью 95 % равна 3519 омметра при вариативности единичных значений от 2052 до 5238 омметра. Вероятностное распределение УЭС коренных пород этому закону не соответствует и состоит из 3-х групп с модами 350, 780 и 2500 омметра. Мультимодальное распределение указывает на литогенную неоднородность строения коренных пород с разным составом и прочностным состоянием. В каждой группе с фиксированной модой значения УЭС распределены по нормальному закону. Общая выборочная оценка наиболее вероятного среднего модального значения УЭС коренных пород в южной и северной части долины, равна 779 омметра при вариативности единичных значений от 30 до 3347 омметра. Более высокие значения средних УЭС в сравнении с г. Якутском автор объясняет меньшей антропогенно-техногенной засоленностью четвертичных отложений и более высокой плотностью коренных пород. По отношению к данным буровых работ ошибка определения методом ВЭЗ глубины залегания коренных пород в большинстве случаев не превышает 20 %. По порядку значений ошибка метода ВЭЗ в долине «Туймаада» равна ошибке

этого метода в криолитозоне Северо-Востока России. Одинаковость ошибок метода ВЭЗ, применённого в разное время в местном и региональном масштабе, делает этот метод геофизики надёжным инструментом в достоверном изучении геоэлектрического строения речных долин в криолитозоне Якутии и всей Восточной Сибири и Дальнего Востока.

Ключевые слова: долина «Туймаада»; мёрзлые четвертичные отложения; коренные породы; метод вертикального электрического зондирования; удельное электрическое сопротивление; нормальное вероятностное распределение; средние значения; глубина; ошибки

Введение

Настоящая статья знакомит читателей с результатами изучения геоэлектрического строения долины р. Лены «Туймаада», где расположен административный и исторический центр Республики Саха (Якутия) г. Якутск. В отличие от предыдущей статьи [1] объектом исследования в этот был не г. Якутск, а находящиеся за его границами южная и северная части долины «Туймаады». Предметом научного изучения петрофизической направленности служит базовая электрофизическая характеристика — удельное электрическое сопротивление (УЭС) мёрзлой толщи четвертичных отложений и коренных пород. Предметом практического изучения структурной направленности предстаёт глубина залегания коренных пород, слагающих основание долины «Туймаады» под толщей четвертичных отложений.

Фактический материал исследований получен в 1973–1995 гг. методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) при проведении опытно-методических работ на площадках инженерно-строительных изысканий с бурением 1–3 опорных структурно-геотермических скважин до глубины залегания коренных пород. В меньшей степени опытно-методические работы методом ВЭЗ и другими методами геофизики выполнялись на глубоких гидрогеологических скважинах, пробуренных Якутской поисково-съёмочной экспедицией (ЯПСЭ) с целью поисков источников питьевого водоснабжения, а также на единичных глубоких скважинах, пробуренных Институтом мерзлотоведения имени П.И. Мельникова (ИМЗ) СО РАН.

Опытно-методические работы и натурные эксперименты в прошлом веке выполнялись в системе Госстроя РСФСР в обязательном порядке и на постоянной основе. Эти работы, курировались Производственным и научно-исследовательским институтом по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС). Всё вместе взятое представляло собой тематические разномасштабные инженерно-геологические исследования с целью сбора, накопления, систематизации и обобщения фактического материала о геолого-геофизических характеристиках мёрзлой грунтовой среды и их статистических взаимосвязей или, иначе говоря, вероятностных отношений [2, с. 22].

Такие многоплановые научно-производственные исследования в настоящее время в РСФСР полностью прекращены по причине их невыгодности и обременительности в организационно-техническом отношении для заказчиков в лице проектно-строительных организаций. Именно поэтому фактический материал настоящей статьи представляет собой редкий по своей обширности и длительности результат натурального эксперимента в криолитозоне Центральной Якутии, ценность которого для наук о Земле проистекает из его петрофизического содержания. А именно, всё ещё дефицита знаний о закономерностях и особенностях вероятностного распределения не только значений УЭС, но и других геофизических характеристик мёрзлых четвертичных отложений и коренных пород на площади крупного геоморфологического элемента Центрально-Якутской равнины, которым является долина «Туймаада».

Район исследований

Район работ находится в расширенной левобережной части долины р. Лена «Туймаада» в среднем её течении между Кангаласским мысом на севере и Табагинским мысом на юге. В центральной части долины расположен г. Якутск. Протяжённость долины «Туймаада» около 70 км, а ширина в максимальном измерении достигает 11–15 км.

По геоморфологическому строению долины «Туймаада» существуют две позиции.

С одной стороны, по схемам В.С. Гриненко и др. [3], построенных на классических представлениях П.А. Соловьёва [4] и С.С. Коржуева [5], долина «Туймаада» состоит из вложенных речных террас. Это террасы голоценового возраста низкой и высокой поймы с протоками и старицами и две надпойменные террасы со сложным строением микрорельефа и рисунком гидросети. Первая надпойменная терраса голоценового возраста называется Якутской, а более высокая вторая терраса голоценового или позднего неоплейстоценового возраста называется Сергелляхской.

С другой стороны, сравнительно недавно учёные Института мерзлотоведения ИМЗ СО РАН [6], на основании результатов детального изучения стратиграфии аллювиальных отложений, предложили упрощённый вариант геоморфологического строения долины «Туймаада» в виде одной безымённой надпойменной террасы дриас-голоценового возраста с разными абсолютными отметками денудационно-аккумулятивной поверхности.

Мощность четвертичных отложений в целом закономерно возрастает от русла долины р. Лены к выходу на дневную поверхность её коренного основания — осадочных пород юрского возраста (песчаников, алевролитов и алевроитов). Этот выход наблюдается в виде уступа эрозионной поверхности Приленского плато высотой 100–120 м над долиной «Туймаада» [7].

Коренные породы относятся к терригенным отложениям юрского возраста. В пойме и надпойменных террасах они преимущественно залегают на глубине 12,4–14,5 и 16,2–22,7 м. По геологическим представлениям поверхность коренных пород имеет выровненную корытообразную форму между левым и правым берегом р. Лены. На этом фоне на участках глубоких протоков и озёрных котловин коренные породы погружаются до 30–40 м и возможно более. Одно из таких погружений обнаружено на Якутской террасе в районе с. Кильдямцы. В этом месте по данным георадиолокации с георадаром «ЛЮЗА-В» кровля коренных пород залегают на глубине 36–40 м с крутым падением (угол около 40°). Такие углубления рассматриваются, как депрессивные впадины блочного типа, возникшие при сбросе левобережной части коренного основания долины «Туймаада» по глубинному Якутскому тектоническому разлому [8, с. 197].

В долине «Туймаада» толща четвертичных отложений находится в вечномёрзлом состоянии. В природных условиях кровля мерзлоты в летне-осенний период времени залегают под сезоннотальным слоем почвогрунтов, чаще всего, на глубине 1,5–2,0 м. В населённых пунктах глубина может достигать 3,0–4,0 м. Природные талики глубиной до 5–7 или 10–15 м встречаются под протоками и озёрами. В немалом количестве и при такой же приблизительно глубине талики встречаются под аварийными зданиями и сооружениями.

По результатам обобщения данных термометрии скважин, полученных в г. Якутске и его окрестности [9], температура мёрзлых четвертичных отложений в нижней части слоя годовых теплооборотов на глубине установки свайных фундаментов 10–15 м изменялась в 1976–2011 гг. от -1,4 до -7,2 °С при общем среднем значении -2,7 °С. Почти такая же температура (около -2,0 °С) наблюдалась в 1930–1940 гг. в природных условиях в ещё необжитой части долины «Туймаада» [10].

В этом сравнении с констатацией практически неизменного многолетнего температурного режима в нижней части слоя годовых теплооборотов (СГТ) в частном порядке проявляется общая региональная и планетарная черта — тепловая инерция, которая в разной мере присуща всем мёрзлым геологическим образованиям Земли. Благодаря этой природной особенности мёрзлые четвертичные отложения долины «Туймаады», состоящие на 80 % из нельдистых незасолённых мелко-среднезернистых песков, сохранили своё твердомёрзлое состояние в период длительного современного климатического потепления с неуклонным ростом приземной температуры воздуха в Якутии. С большой вероятностью твердомёрзлое состояние песков с температурой на подошве СГТ не выше $-1,0$ °С сохранится и в ближайшем будущем в течение нескольких десятков лет. Такие надежды небезосновательны, принимая во внимание прогнозы учёных ИМЗ СО РАН [11; 12]. В соответствии с этими прогнозами, начиная с 2020 г. в Якутии начнётся очередной этап медленного, но неуклонного в своей многолетней тенденции похолодания климата, периодически повторяющийся на Земле на протяжении исторического масштаба времени.

Метод и фактический материал исследований

Изучение геоэлектрического строения долины «Туймаады» выполнялось методом ВЭЗ в варианте ИМЗ СО РАН с применением многоэлектродной косы, которая сокращала время электрических зондирований и повышала точность полевых измерений. Общая методика работ методом ВЭЗ изложена в учебниках, например, в учебнике Ю.В. Якубовского и Л.Л. Ляхова [13]. Вопросы применения метода ВЭЗ в инженерно-строительных изысканиях освещены в республиканских строительных нормах Госстроя РСФСР [14].

На начальных стадиях работ методом ВЭЗ применялся прибор ЭСК-1. В дальнейшем применялся прибор АЭ-72. Стоит заметить, что в прошлом веке эта, по современным меркам, примитивная техника измерений была чуть ли не единственной при проведении работ методом ВЭЗ в трестах инженерно-строительных изысканий НПО «Стройизыскания» Госстроя РСФСР.

Работы методом ВЭЗ выполнялись симметричной 4-х электродной установкой Шлюмберже с длиной питающей линии от 0,6–3,2 до 440–940 м и 2-х приёмных линий с длиной 0,2 и 6,0 м. Установка ориентировалась вдоль простирания долины «Туймаада». Источником постоянного тока служил комплект из 4-х последовательно соединённых батарей «АМЦГ-У-160» в связке с обычными батарейками для карманных фонариков. В такой комплектации напряжение в цепи питающей линии ступенчатым образом изменялось от 1,5 до 400 вольт, что обеспечивало глубину изучения методом ВЭЗ геоэлектрического разреза долины «Туймаада» до 50–100 м.

Количественная интерпретация кривых ВЭЗ выполнялась обычным на тот период времени ручным путём с использованием 3-х слойных и вспомогательных палеток. Практические вопросы интерпретации подробно изложены в работах А.М. Пылаева [15] и Е.Н. Калёнова [16].

Процесс интерпретации был разделён на 2 этапа.

На первом этапе определение параметров геоэлектрического разреза (УЭС, мощностей и глубины залегания границ слоёв) осуществлялось приблизительно. То есть исходя из общих представлений о геологическом строении и типе геоэлектрического разреза долины «Туймаада», а также априорных знаний об УЭС мёрзлых четвертичных отложений и коренных пород. На втором этапе результаты интерпретации уточнялись с учётом имеющихся данных, полученных при бурении и термометрии опорных скважин с последующим лабораторным анализом керн скважин с целью определения показателей физико-механических и химических свойств четвертичных отложений и коренных пород.

Такой 2-х стадийный подход с последовательным приближением к реальным значениям параметров геоэлектрического разреза важен своей образовательной ролью в профессиональном развитии инженеров-геофизиков, а также возможностью незамедлительной проверки в камеральных условиях ошибок метода ВЭЗ в определении глубины залегания основной опорной структурной границы — кровли коренных пород без бурения заверочных или контрольных скважин.

Фактический материал исследований состоит из определений методом ВЭЗ параметров геоэлектрического разреза в 349 точках скважин, пробуренных проектно-изыскательскими организациями и ЯПСЭ до глубины залегания коренных пород. Первый параметр — средневзвешенные по мощности литолого-фациальных слоёв значения УЭС всей толщи мёрзлых четвертичных отложений. Второй параметр — значения УЭС коренных пород. Третий параметр — глубина залегания кровли коренных пород.

К большому сожалению, из-за отсутствия данных по инструментальной привязке в настоящей статье нет возможности показать на топографической основе расположение точек скважин и ВЭЗ. По этой же причине в настоящей работе нет рисунков, иллюстрирующих фоновые закономерности и локальные особенности площадной изменчивости в долине «Туймаада» значений УЭС и глубины залегания коренных пород.

Результаты статистического анализа

Изучение вероятностной структуры и статистик изменчивости параметров геоэлектрического разреза в долине «Туймаада» выполнялось с помощью программы «Стадия» [17]. Одной из важных её особенностей является автоматическое разбиение выборочной совокупности на корректное число групп (бинов) по эвристическому алгоритму, разработанному А.П. Кулаичевым. Без этой помощи трудно найти оптимальное решение между желанием увидеть общую закономерность или детали вероятностных распределений значений УЭС четвертичных отложений и коренных пород, а также глубины залегания этих пород. Рассмотрим результаты статистического анализа в петрофизическом и структурном направлении, отдавая приоритет первенства петрофизическому направлению, т. е. характеристике УЭС.

Удельное электрическое сопротивление

Тестовая проверка по критериям Колмогорова, омега-квадрат, хи-квадрат показала, что вероятностное распределение значений УЭС четвертичных отложений теоретически соответствует нормальному закону. Распределение значений УЭС коренных пород этому закону не соответствует и с почти равной погрешностью описывается разными законами.

И.Н. Модин и В.А. Шевнин считают некорректным такой свободный выбор законов распределений. В их работе приводится аргументация в пользу единственно правильного описания вероятностных распределений значений УЭС логнормальным законом [18]. Упомянутые авторы объективность своей бескомпромиссной позиции, усиливают множеством ссылок на заслуживающие доверия авторитетные источники. Например, на малоизвестную фундаментальную работу по геостатистике Ж. Матерона [19], а также на работы И.М. Блоха, Г.С. Вахромеева, В.С. Якупова, В.К. Рыбина, А.П. Савина и других. От себя добавим, что и в геологии, в частности, по мнению Н.К. Разумовского вероятностные закономерности большинства явлений, изучаемых в литологии, петрографии и геохимии, корректно описывает логнормальный закон [20].

На этом общепринятом геофизиками и геологами основании все формально равноправные законы (Вейбулла, Релея, экстремальных значений и др.) вероятностного описания значений УЭС коренных пород следует считать некорректными кроме логнормального закона. Тогда возникает вопрос: почему в отличие от мёрзлых коренных пород значения УЭС мёрзлых четвертичных отложений распределены по нормальному, а не по логнормальному закону?

Главная причина этого кажущегося системного разногласия отчасти объяснена в предыдущей статье [1]. К этому объяснению остаётся добавить, усиливая ранее сказанное, что четвертичные отложения и коренные породы представляют собой разногенетические структурно-вещественные геологические образования. Они зарождались, развивались и изменялись в совершенно разных пространственно-временных условиях. И, если мёрзлая толща четвертичных отложений в целом представляет собой компактную по местоположению, размерам и однородную по вещественному составу структурную единицу долины «Туймаады» или образно говоря «собственность» этой долины, то этого не скажешь о коренных породах. Они генетически не принадлежат долине «Туймаада», представляя собой куда более сложную в историческом развитии масштабную структурную единицу Сибирской платформы в границах Центрально-Якутской низменности. В долине «Туймаада» осадочные коренные породы мезозойского возраста представляют лишь малую часть от всей занимаемой ими обозначенной территории. Будучи частью, в которой возрастает роль случайных локальных воздействий со стороны отдельных факторов (литологических, тектонических, криогенных и др.), порождённых сравнительно мелкими структурно-петрофизическими неоднородностями, они принципиально не могут воспроизвести в себе распределение значений УЭС по нормальному закону. В идеале такое лишь возможно и впервые теоретически доказано Яковом Бернулли [21] для предельного случая, когда число разносторонне действующих случайных факторов на формирование вероятностного распределения какой-либо физической величины становится большим и не контролируемым, а объём выборочной совокупности определений значений величины приближается к бесконечности. В математической статистике таким минимально допустимым пределом, является число определений превышающее одну тысячу. Если мысленно допустить, что в пределах Сибирской платформы методом ВЭЗ определено, например, хотя бы 10^4 значений УЭС осадочных пород, то в соответствии с законом больших чисел [21; 22] их вероятностное распределение будет с исчезающе малой ошибкой симметричным относительно равных показателей средних значений (арифметического, медианного, модального). То есть будет строго описываться нормальным законом. Все остальные известные законы вероятностных распределений, включая логнормальный закон, представляют собой специфические по областям применения и усечённые по недостатку определений формы нормального закона.

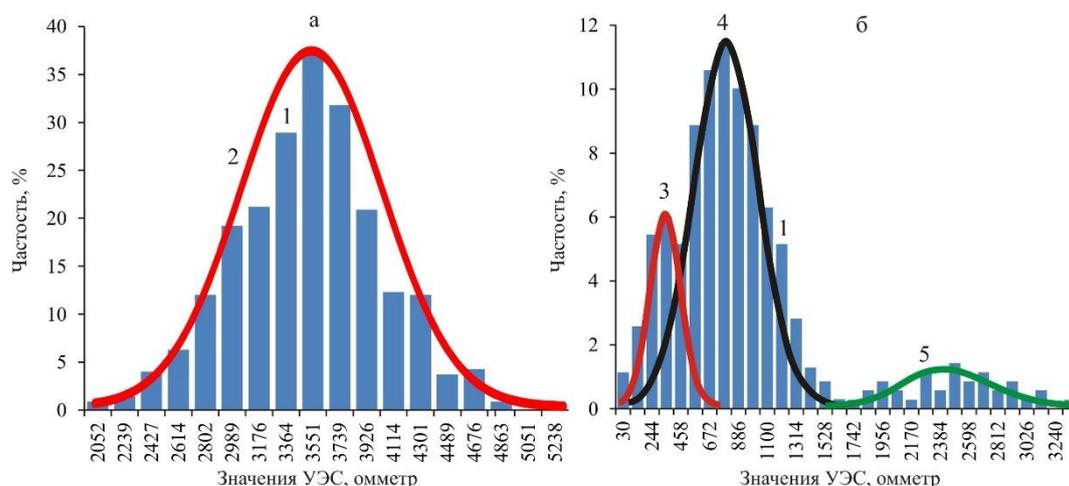
Гистограмма и вариограмма УЭС мёрзлых четвертичных отложений, нерасчленённых по составу, фациальным условиям образования, физико-механическим и химическим свойствам, а также температуре, показана на рисунке 1а. Гистограмма и вариограммы УЭС коренных пород показана на рисунке 1б.

Описательная статистика УЭС приведена в таблице 1.

Рассмотрим особенности вероятностных распределений значений УЭС в долине «Туймаада» за пределами г. Якутска.

УЭС мёрзлых четвертичных отложений изменяется от 2052 до 5238 омметра. Группы относительно низких и высоких значений УЭС с равной вероятностью сосредоточены возле средних показателей 3519–3551 омметра. По отношению к теоретической оценке генеральной средней УЭС, полученной по бесконечному числу определений, ошибка определения по 349

определением выборочной оценки среднеарифметического значения УЭС с вероятностью 95 % равна ± 36 омметра.



1 — гистограммы фактических распределений значений УЭС; 2 — вариограмма теоретических нормальных распределений значений УЭС четвертичных отложений; 3, 4, 5 — групповые вариограммы теоретических нормальных распределений значений УЭС литогенных неоднородностей коренных пород

Рисунок 1. Графики вероятностных распределений значений УЭС мёрзлых четвертичных отложений (а) и коренных пород (б). Объём выборки — 349 определений. Условные обозначения (составлен автором)

Таблица 1

Статистика значений УЭС в долине р. Лены «Туймаада»

Статистический показатель	Вся долина «Туймаада» без г. Якутска		г. Якутск	
	1	2	1	2
Среднее арифметическое значение (САР)	3519	954	1194	268
Среднее медианное значение	3551	779	1201	217
Среднее модальное значение	3551	779	887	214
Стандартное отклонение	515	636	254	182
Коэффициент вариации, %	14,6	66,6	21,3	67,8
Минимальное значение	2052	30	468	24
Максимальное значение	5238	3347	1965	1037
Количество определений	349	349	484	484
Доверительный интервал САР (95 %)	3482–3555	887–1020	1217–1174	252–284

Примечание: 1 и 2 — УЭС мёрзлых четвертичных отложений и коренных пород в омметрах. Составлена автором

Полученная вероятностная оценка выборочного среднего УЭС характеризует мёрзлые четвертичные отложения в южной (между п. Табага и г. Якутском) и северной (между г. Якутском и п. Кангалассы) части долины «Туймаады». То есть в тех природных условиях, которые слабо или вовсе не затронуты влиянием антропогенно-техногенных процессов. Наиболее сильно их влияние в г. Якутске, где средние значения УЭС мёрзлых четвертичных отложений почти в три раза ниже (1200 омметра) [1]. Причина такого аномального снижения объясняется высоким фоновым химическим загрязнением надмерзлотных вод и почво-грунтов сезонноталого слоя и прилегающей к нему верхней части мёрзлых глинисто-песчаных отложений на давно обжитой и плотно застроенной территории г. Якутска.

По данным Н.П. Анисимовой [23, с. 112–113] долговременное химическое загрязнение привело к образованию ореолов засоления до глубины 3,5–4,0 м. На участках с сильным промышленно-сельскохозяйственным загрязнением засоление достигает глубины 6–7 м. Более поздними криогидрогеохимическими исследованиями в мёрзлых четвертичных отложениях

установлены 3 яруса криопэггов¹ [24, с. 105–117]. Первый ярус надмерзлотного генезиса залегает на 1,8–4,5 м. Второй и третий ярусы межмерзлотного генезиса залегают на 7,0–8,0 и 17–19 м.

При средней мощности криопэггов 2 и 3 яруса, равных 0,3–0,5 м, их суммарная мощность не превышает 1 м, а доля в песках составляет 6,8 %. Хотя доля криопэггов невелика, но их высокая минерализация, достигающая 30–50 г/л, существенно повлияла на снижение УЭС мёрзлых четвертичных отложений на территории г. Якутска.

Криопэги встречаются и в природных условиях за пределами г. Якутска, но их доля невелика и равна 4,2–5,8 %. Поэтому и здесь наблюдается в единичных случаях снижение значений УЭС под влиянием криопэггов, но мера этого снижения существенно меньше, чем в г. Якутске (не ниже 2000 омметра). Доля таких участков составляет 8,6 %.

Доля высоких значений УЭС (выше 4400 омметра) равна 4,2 %. Их природа неоднозначна. С одной стороны — это участки долины «Туймаады» с более высокой объёмной сегрегационной льдистостью глинистых разностей (суглинков, супесей) имеющих слоисто-сетчатую криогенную текстуру. Эти озёрно-болотные образования, слагают верхнюю часть четвертичных отложений преимущественно до глубины 3–5 м. С другой стороны — это участки долины с преобладающим развитием в четвертичных отложениях незасолённых песчаных разностей аллювиального генезиса при небольшой мощности или полном отсутствии покрывающего чехла в разной мере засоленных глинистых разностей. Большая же часть мёрзлой толщи четвертичных отложений с умеренно низкой фоновой температурой сложена в долине «Туймаада» за пределами г. Якутска нельдистыми незасолёнными мелко-среднезернистыми песками с массивной криогенной текстурой.

Если задать уровень доверия к результатам определений значений УЭС методом ВЭЗ равным около 70 %, как это принято для методов геофизики в геологии², то благоприятные для строительства инженерных сооружений прочные в механическом отношении мёрзлые аллювиальные образования преимущественно песчаного состава, характеризуются близкими значениями УЭС, равными 3000–4000 омметра.

Близость разброса часто встречающихся значений УЭС, как и их низкая общая интегральная изменчивость, равная по коэффициенту вариации 14,6 %, является статистической мерой не точечной, как это было бы со скважинами, а объёмной по данным метода ВЭЗ однородности литолого-фациального строения и криогенно-теплого состояния мёрзлой толщи четвертичных отложений долины «Туймаады».

Иное дело коренные породы, у которых аналогичная мера изменчивости гораздо выше и составляет около 70 %. В г. Якутске почти такая же изменчивость (67,8 %). В этих цифрах выражает себя литогенная неоднородность коренных пород, усиленная до их погребения под толщей четвертичных отложений, процессами физического и химического выветривания. Стоит также отметить и активную в прошлом геологическом времени деятельность тектонических процессов, в результате которой образовался протяжённый глубинный Якутский разлом, частично пересекающий долину «Туймаада» [25] с сопутствующими оперяющими разломами меньшего размера вместе с многочисленными зонами дробления и трещиноватости коренных пород.

¹ По Н.И. Толстихину криопэги означают высокоминерализованную воду с отрицательной температурой.

² С учётом присущей им геологической неоднозначности и математической некорректности решаемых задач.

В целом, при изменчивости значений УЭС коренных пород от 30 до 3347 омметра наиболее вероятное среднее значение (общая мода) равно 779 омметра. Так, как распределение значений УЭС коренных пород не описывается нормальным законом, то корректно определить ошибку выборочной оценки среднеарифметического значения УЭС по отношению к теоретической оценке генеральной средней УЭС не представляется возможным.

Детальный статистический анализ групповой изменчивости значений УЭС коренных пород показывает, что общее вероятностное распределение этой электрофизической характеристики имеет мультипликативный характер и состоит из трёх хорошо разрешённых композиций. В каждой из них значения УЭС распределены по нормальному вероятностному закону с разными модами (рис. 1б). Такая особенность указывает на неоднородность строения коренных пород с существованием в них 3-х групп с разным электрическим сопротивлением.

Недостаток геологических данных затрудняет объяснение их природы с необходимой достоверностью и однозначностью. Сделаем это предположительно с фациально-петрографической позиции. Эта позиция концептуально близка к позиции Н.Н. Гриба. Этот учёный геофизик считал, что основное влияние на свойства³ коренных пород в Южно-Якутском бассейне оказывают фациально-стратиграфические факторы, обусловленные процессами осадконакопления и физико-химического выветривания [26, с. 94].

Согласно принятой позиции геологическая природа 1-ой группы с модой (средним наиболее вероятным значением УЭС = 350 омметра) объясняется смешанным составом и карбонатно-кремниевым цементом коренных пород, а также их структурно-текстурными особенностями на границе песчаной и глинистой фаций. По данным ЯПСЭ в таких случаях коренные породы, тяготеющие к глинистой фации, представлены переслаиванием крупнозернистых слабосцементированных песчаников, алевролитов с включением древесины, примесью рыхлых алевролитов и тонкими прослойками глин [7, с. 135]. Доля таких малопрочных полускальных образований в выборочной совокупности фактического материала составляет 20,3 %.

Во 2-ой группе более высокие значения УЭС, сосредоточенные возле моды, равной 780 омметра, рассматриваются, как признак уменьшения в коренных породах глинистых примесей с появлением фациальных разностей в виде более сцементированных мелкозернистых песчаников. Доля таких образований максимальна и составляет 69,4 %.

В третьей группе с относительно аномальной высокой модой УЭС, равной 2500 омметра, коренные породы рассматриваются, как очень прочные скальные монолитные образования в виде кварцевых песчаников. Их доля минимальна и составляет 10,3 %.

В северной части долины «Туймаады», расположенной между г. Якутском и п. Кангалассы, более вероятен иной вариант объяснения природы третьей моды УЭС. Он допускает появление в коренных породах слоёв бурого угля [3] или льда на участках тектонического дробления и трещиноватости.

Таким образом, за пределами г. Якутска коренное основание долины «Туймаады» в большинстве случаев (почти 80 %) предположительно сложено преимущественно прочными и особо прочными песчаниками.

³ Скорости распространения сейсмических упругих волн, электрического сопротивления, радиоактивности и прочностных свойств.

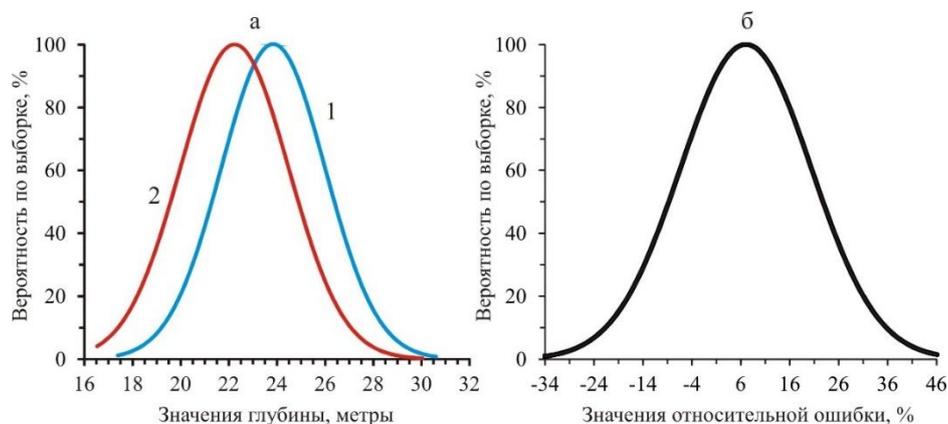
Глубина залегания коренных пород

Определение глубины залегания коренных пород в прошлом веке была одной из основных инженерно-геологических задач, которую необходимо было решать при производстве инженерно-строительных изысканий методами геофизики. Применяя эти методы на начальных стадиях изысканий (технико-экономического обоснования и рабочего проекта) с целью обоснования выбора оптимального размещения на изыскиваемой территории проектного объёма буровых работ или принятия взвешенного решения о сокращении этого объёма.

Задача определения методами геофизики глубины залегания опорной структурной границы между мёрзлой толщей четвертичных отложений и коренными породами сохраняет свою актуальность и в настоящее время. Возможно, она сохранится и в будущем при ожидаемом смещении процесса строительства жилых высотных комплексов, а также промышленных объектов за пределы г. Якутска в незастроенную часть долины «Туймаады». При таком прогнозе знание глубины залегания коренных пород, рассматриваемых проектировщиками и строителями, как прочное полускально-скальное основание инженерных сооружений, становится неизбежно обязательным. На том основании, что в сферу общего механического взаимодействия мёрзлой толщи четвертичных отложений не с отдельным инженерным сооружением, а со всей их совокупностью (площадью общей застройки) начинает вовлекаться горизонт коренных пород.

Посмотрим (рис. 2а) графики вариограмм. Они теоретически корректно аппроксимируют по закону нормального вероятностного распределения графики гистограмм глубины залегания коренных пород. Значения этой основной структурной характеристики определены по данным буровых работ и методом ВЭЗ в 349 точках скважин.

Если бы не разница в средних значениях, то вероятностное распределение значений глубины залегания коренных пород по данным метода ВЭЗ в точности повторяло бы распределение по данным буровых работ. Действительно, по разбросу минимальной и максимальной глубины геолого-геофизические данные практически неотличимы. По данным бурения глубина изменяется от 17,4 до 30,6 м, а по данным ВЭЗ от 16,5 до 30,0 м. Да, и по показателю стандартного отклонения, охватывающего почти 70 % выборочной совокупности фактического материала, значения глубины сосредоточены практически в одном и том же интервале. По данным буровых работ в интервале 21,6–26,0 м, а по данным ВЭЗ в интервале 20,0–24,5 м.



1 — глубина по данным буровых работ; 2 — глубина по данным метода ВЭЗ

Рисунок 2. Графики вариограмм нормальных вероятностных распределений значений глубины залегания коренных пород (а) и ошибок её определения методом ВЭЗ (б). Объём выборки — 349 определений. Условные обозначения (составлен автором)

Наблюдаемая разница (табл. 2, рис. 2а) при слабой площадной изменчивости не более 10 % показывает, что в среднем глубина залегания коренных пород по данным ВЭЗ (21–22 м) в сравнении с данными буровых работ (23–24 м) занижена незначительно. Всего-навсего на 6–7 % или в абсолютном показателе на 0,9–1,6 м.

Таблица 2

Статистика значений глубины залегания и ошибок её определения для коренных пород методом ВЭЗ в долине р. Лены «Туймаада»

Статистический показатель	Глубина, метры		Ошибки глубины	
	скважины	метод ВЭЗ	%	м
Среднее арифметическое (САР)	23.8	22.2	7.1	1.6
Стандартная ошибка	0.12	0.12	0.72	0.16
Медианное среднее	23.9	22.2	5.9	0.9
Модальное среднее	22.6	21.3	5.8	0.9
Стандартное отклонение	2.16	2.25	13.4	3.08
Коэффициент вариации, %	9.1	10.1	189	196
Минимальное значение	17.4	16.5	-34.4	-8.8
Максимальное значение	30.6	30	46.1	10.6
Количество определений	349	349	349	349
Доверительный интервал САР (95 %)	0.23	0.24	2.65	0.33

Составлена автором

Образование небольшой систематической ошибки объясняется завышением на 1-ой стадии предварительной интерпретации кривых ВЭЗ значений УЭС мёрзлой толщи четвертичных отложений по отношению к истинным значениям УЭС, которые были определены на 2-ой конечной стадии интерпретации после корректировки результатов интерпретации к точным значениям глубины залегания коренных пород, установленных бурением опорных скважин.

Из описательной статистики, представленной в табл. 2, следует, что при небольшой и почти равной по данным бурения скважин и метода ВЭЗ площадной изменчивости, оцениваемой по коэффициенту вариации (около 9 и 10 %), разброс ошибок метода ВЭЗ в определении глубины залегания кровли коренных пород на порядок больше. Это обусловлено объёмностью результатов электрического зондирования методом ВЭЗ в сравнении с точечными результатами, получаемыми при бурении скважин. В геологии эти данные принято считать абсолютно точными, что с некоторыми оговорками совершенно справедливо. Однако по показателю объёмности более полными данными, а значит, и более достоверными по категории воспроизводимости следует считать данные геофизики, в частности, данные метода ВЭЗ. Разумеется, вместо противопоставления геолого-геофизических результатов изучения глубины залегания коренных пород, как и при решении любой другой геологической задачи, нужно находить точки соприкосновения результатов и творчески их объединять.

Расхождение объёмных данных метода ВЭЗ с точечными данными буровых работ означает, что в окрестности скважин в пределах охвата электрическим полем кровля коренных пород залегает не горизонтально и по разным причинам (экзогенным, тектоническим и др.) может непредсказуемым образом существенно изменяться вверх или вниз по глубине. В работе В.В. Спектра и др. [8] показано, что на общем фоне глубины залегания коренных пород (около 20–25 м) на 2-ой высокой надпойменной Сергелляхской террасе могут неожиданно встречаться локализованные блоковые структуры тектонической природы с глубиной залегания коренных пород до 40 м.

С учётом знака средние относительные ошибки равны 6–7 % и изменяются от -34,4 до 46,1 %. С вероятностью около 70–80 % ошибки не превышают 15 и 20 %. Оценивать погрешность метода ВЭЗ с вероятностью 95 % нельзя. Более высокий уровень доверия к

результатам геофизических работ превышает реальные физические возможности метода, которые ограничены его принципиальными недостатками, присущими всем методам геофизики⁴. В рассматриваемом случае ошибки в занижении глубины залегания кровли коренных пород становятся недопустимо большими (более 34 %). Для проектировщиков и инженеров-геологов такая ошибка может стать убедительным основанием для принятия формально правильного, но по сути неверного решения о непригодности метода ВЭЗ для определения глубины залегания коренных пород в долине «Туймаада».

В заключение отметим важную региональную черту метода ВЭЗ. А именно, по порядку значений ошибок точность метода ВЭЗ в определении глубины залегания коренных пород одинакова, как в криолитозоне Центральной Якутии в долине р. Лены «Туймаада», так и в криолитозоне Магаданского края. По данным известного учёного в области электротометрии мёрзлых горных пород В.С. Якупова, много лет проработавшего в этой части Северо-Востока России, относительная ошибка метода ВЭЗ при среднем значении 17,2 % в большинстве случаев составляет 12,3–20,9 % [27, с. 174]. Более того, такие небольшие ошибки (не более 10–15 %) решения обозначенной задачи в сложных геокриологических условиях методом корреляционных преломленных волн (КМПВ) установлены другим крупным учёным геофизиком, но уже в области сейсмометрии криолитозоны Магаданского края и Чукотки С.М. Седовым [28].

Заключение

Методом ВЭЗ в пределах всей долины р. Лены «Туймаада» установлены не только разные законы пространственных вероятностных распределений значений УЭС, но их разные обобщённые выборочные оценки средних значений, полученные для мёрзлой толщи четвертичных отложений (3500 омметра) и коренных пород (780 омметра). Средние значения УЭС рекомендуется использовать, как априорные оценки с целью определения в долине «Туймаада» средней глубины залегания коренных пород, как традиционным методом ВЭЗ, так и его современным аналогом — методом электротомографии при необходимости дополняя их методом георадиолокации в местах с плотной застройкой инженерных сооружений, где гальваническое заземление электродов невозможно или затруднено. Такой подход с опережением дорогостоящих и трудоёмких буровых работ *на начальных стадиях* проектно-строительных изысканий позволяет экономично, быстро и экологически чисто изучать положение кровли коренных пород в ещё незастроенной части долины «Туймаады». В большинстве случаев ошибки определения методом ВЭЗ глубины залегания этой структурной границы не превышают $\pm 20\%$. Порядок ошибок соизмерим не только с ошибками метода ВЭЗ, но и метода КМПВ, применявшихся в криолитозоне Северо-Востока России для решения обозначенной задачи.

⁴ Геологической неоднозначностью изучения геологической среды и математической некорректностью решения обратных задач в оценке строения, состава, состояния и свойств геологической среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нерадовский Л.Г. Статистика удельного электрического сопротивления мерзлых рыхлых отложений и осадочных пород долины р. Лена “Туймаада” // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2019. — Т. 27, № 2. — С. 49–55. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2019-24-2-4>.
2. Левкович А.И. Методика обоснования состава и объёмов инженерно-геологических изысканий для строительства различных типов зданий и сооружений промышленного, сельскохозяйственного и жилищно-гражданского назначения в районах распространения вечномёрзлых грунтов с учётом требований проектирования. — М.: Госстрой РФСР. НПО “Стройизыскания”, 1989. — 173 с.
3. Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластенов Ю.Л., Щербаков О.И. Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. — Якутск: Изд-во Якутского гос. ун-та, 1995. — С. 3–20.
4. Соловьев П.А. Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 144 с.
5. Коржув С.С. Геоморфология долины средней Лены и прилегающих районов. — М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. — 151 с.
6. Спектор В.В. Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на “Якутском разбое” / В.В. Спектор, Н.Т. Бакулина, В.Б. Спектор // Геоморфология. — 2008, № 1. — С. 87–94.
7. Петров С.Б., Безрук Л.Н. Отчёт по изучению, детальному картированию и прогнозированию развития экзогенных геологических процессов на территории Большого Якутска в 1983–1985 гг. Т. I (текст отчёта) / С.Б. Петров, Л.Н. Безрук. — ПГО “Якутскгеология”. Инв. № 6848. — 223 с.
8. Спектор В.Б. Выступ юрских отложений на днище долины р. Лена / В.Б. Спектор, В.В. Спектор, Н.Т. Бакулина, Н.В. Торговкин, А.М. Черепанова, Г.Т. Максимов, Л.Г. Нерадовский. // Доклады Академии Наук. — 2016. — Т. 467, № 2. — С. 196–199.
9. Нерадовский Л.Г. Изменение фоновой температуры мерзлых грунтов в Якутске в период потепления климата в Сибири (1976–2011) // Криосфера Земли. — 2020. — Т. XXIV, № 4. — С. 46–57. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-4(46-57).
10. Соловьев П.А. О влиянии застройки города Якутска на температуру многолетнемерзлых горных пород // Труды Северо-Восточного отделения Института мерзлотоведения. Вып. 1. — Якутск: Якутская республиканская типография, 1958. — С. 179–191.
11. Балобаев В.Т. Прогноз изменения климата и мощности мёрзлых пород Центральной Якутии до 2200 г. / В.Т. Балобаев, Ю.Б. Скачков, Н.Н. Шендер // География и природные ресурсы. — 2009, № 2. — С. 50–55.
12. Нерадовский Л.Г. Прогноз температуры воздуха в Якутии до 2050 года / Л.Г. Нерадовский, Ю.Б. Скачков // Материалы IX Международного симпозиума “Проблемы инженерного мерзлотоведения” (Мирный, 3–7 сент. 2011 г.). — Якутск: ИМЗ СО РАН, 2011. — С. 389–393.

13. Якубовский Ю.В. Электроразведка. Издание третье, переработанное и дополненное / Ю.В. Якубовский, Л.Л. Ляхов. — М.: “Недра”, 1974. — 376 с.
14. Инструкция по применению электроразведки при инженерных изысканиях в строительстве. Постоянный ток и естественное поле. Республиканские строительные нормы. РСН 43-74. — М.: Изд-во Госстроя РСФСР, 1975. — 120 с.
15. Пылаев А.М. Руководство по интерпретации вертикальных электрических зондирований. Издание второе, исправленное. — М.: Недра, 1968. — 148 с.
16. Калёнов Е.Н. Интерпретация кривых вертикальных электрических зондирований. — М.: Гостоптехиздат, 1957. — 472 с.
17. Кулаичев А.П. Методы и средства комплексного анализа данных, 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Изд-во ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
18. Модин И.Н. Соответствие данных электроразведки логнормальнольному закону распределения / И.Н. Модин, В.А. Шевнин // Прикладная геофизика. Вып. 109. — М.: Изд-во “Недра”, 1984. — С. 75–82.
19. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. Науки о Земле. Книга первая. Т. 12. Пер. с франц. Ю.В. Рощина. — М.: Изд-во “Мир”, 1968. — 408 с.
20. Разумовский Н.К. О значении логарифмически нормального распределения частот в петрологии и геохимии // Доклады Академии Наук СССР. — 1941. — Т. 33, № 1. — С. 48–49.
21. Бернулли Я. О законе больших чисел: Пер. с лат. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. — 176 с.
22. Пасхавер И.С. Закон больших чисел и статистические закономерности. — М.: Статистика, 1974. — 152 с.
23. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мёрзлой зоны. — Новосибирск: Наука, 1981. — 153 с.
24. Анисимова Н.П. Гидрогеохимические исследования криолитозоны Центральной Якутии / Н.П. Анисимова, Н.А. Павлова. — Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2014. — 189 с.
25. Мишнин В.М. Главная геоструктурная триада и нелинейная металлогения Якутии // Вестник Госкомгеологии РС(Я). Материалы по геологии и полезным ископаемым РС(Я). — Якутск, 2004, № 1(6). — С. 21–33.
26. Гриб Н.Н. Физико-механические свойства углевмещающих пород Южно-Якутского бассейна / Н.Н. Гриб, А.В. Самохин. — Новосибирск: Наука, 1999. — 240 с.
27. Якупов В.С. Геофизика криолитозоны. — Якутск: Изд-во ЯГУ им. М.К. Аммосова, 2008. — 342 с.
28. Седов Б.М. О точности определения мощности рыхлых отложений сейсморазведкой при поисках россыпей золота // Колыма. — 1970, № 7. — С. 46–47.

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

Experience in VES investigation of resistivity structure of the Tuymaada Valley, middle Lena River

Abstract. This paper discusses experience from the application of direct current vertical resistivity sounding in engineering surveys conducted in 1973–1995 in the Tuymaada Valley of the middle Lena River. Using 349 borehole measurements, the probabilistic variability of three main parameters of resistivity sections is examined for the northern and southern parts of the valley outside of Yakutsk. The first two parameters are electrical resistivities of the frozen Quaternary deposits and the underlying bedrock consisting of sedimentary rocks. The third parameter is bedrock depth. The resistivities of the Quaternary deposits and the bedrock depths show normal probability distributions. The sample estimate of the arithmetic mean resistivity values for the Quaternary deposits in the 95 % confidence interval is 3519 ohm-m, with individual values varying from 2052 to 5238 ohm-m. The probability distribution of the bedrock resistivities is not normal and consists of three groups with modes of 350, 780 and 2500 ohm-m. The multimodal distribution suggests that the bedrock is lithologically inhomogeneous containing a range of rock types with different strengths. The resistivities in each mode group are normally distributed. The overall sample estimate of the most probable mean modal resistivity of the rocks in the southern and northern parts of the valley is 779 ohm-m, while the measured values range from 30 to 3347 ohm-m. The higher mean resistivities compared to Yakutsk are due to the lower anthropogenic salinity of the Quaternary deposits and the higher density of the rocks. The bedrock depths determined by VES are generally consistent with drilling data, with errors mostly less than 20 %. In order of magnitude, the error of the VES method in the Tuymaada Valley is similar to that observed in other permafrost regions of northeastern Russia. The similar levels of error in the available local- and regional-scale VES measurements indicates that VES provides a reliable tool for accurately describing the resistivity structure of river valleys in permafrost regions of Yakutia and elsewhere in Eastern Siberia and the Far East.

Keywords: Tuymaada valley; frozen Quaternary deposits; bedrock; vertical electrical sounding; electrical resistivity; depth; error