

роны — на усиление геологической содержательности результатов интерпретации комплексных геофизических данных, а с другой стороны — на повышение геофизической грамотности геологов, использующих результаты геофизических работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонин, А.А. О возможности построения бесплатформенного управляющего навигационно-гравиметрического комплекса беспилотного летательного аппарата / А.А. Афонин, А.С. Сулаков, Г.Г. Ямашев, Д.А. Михайлин, Л.А. Мирзоян, Д.В. Курмаков // Труды МАИ, 2013. — № 66.
2. Бабаянц, П.С. Алгоритм решения прогнозно-поисковых задач в рамках вероятностно-статистического подхода для качественных признаков / П.С. Бабаянц // Изв. вузов. Геология и разведка. — 1990. — № 1.
3. Бабаянц, П.С. Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 31-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского / П.С. Бабаянц, Ю.И. Блох, А.А. Трусов. — М: ОИФЗ РАН, 2004. — С. 11.
4. Бабаянц, П.С. Аэрогеофизические технологии при поисках месторождений золота: современные тенденции / П.С. Бабаянц, О.Р. Контарович, А.А. Трусов // Золото и технологии. — 2018. — № 4(42). — С. 100–104.
5. Бабаянц, П.С. Комплексные аэрогеофизические работы при поисках месторождений урана гидрогенного типа / П.С. Бабаянц, А.А. Трусов, Т.Ю. Лаврова // Разведка и охрана недр. — 2011. — № 7. — С. 56–60.
6. Бабаянц, П.С. Пакет программ прогноза слабопроявленного оруденения по комплексу геофизических данных / П.С. Бабаянц, А.А. Трусов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 36-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. Казань, 26–31 января 2009 г. — С. 29–31.
7. Багрянский, А.А. MobileMT — следующий шаг в развитии аэроэлектромагнитных систем / А.А. Багрянский / Майнекс-2018, материалы форума / <http://minexrussia.com/2018/speakers/andrej-aleksandrovich-bagryanskij/>.

8. Багрянский, А.А. Аэроэлектромагнитная технология ZTEM для глубинного изучения недр / А.А. Багрянский, А.Ю. Приходько, Н. Боурнас, Ж. Лего // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 5. — С. 36–41.
9. Блох, Ю.И. Программа «IGLA» для интерактивной экспресс-интерпретации локальных гравитационных и магнитных аномалий / Ю.И. Блох, А.А. Трусов // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: матер. 34-й сессии междунар. семинара им. Д.Г. Успенского. — М: ИФЗ РАН, 2007. — С. 36–38.
10. Дортман, Н.Б. Петрофизика: Справочник. В трех книгах. Книга первая. Горные породы и полезные ископаемые / Н.Б. Дортман. — М.: Недра, 1992. — 391 стр.
11. Колмаков, А.В. Моделирование морфологии отражающих горизонтов в межпрофильном пространстве по данным потенциальных полей методами глубокого обучения / А.В. Колмаков, А.А. Трусов, А.Л. Мейснер, Г.С. Григорьев // Тр. III Междунар. геолог-геофизической конференции и выставки «ГеоЕвразия 2020. Современные технологии изучения и освоения недр Евразии» Т. III (III) [сборник]. — Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2020. — С. 94–99.
12. Dransfield, M.H. The FALCON® airborne gravity gradiometer systems / M.H. Dransfield, J.B. Lee // Geoscience Australia Record 2004/18: Airborne Gravity 2004: Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop, P. 15–20.
13. Herrera-May, A. Recent Advances of MEMS Resonators for Lorentz Force Based Magnetic Field Sensors: Design, Applications and Challenges / Herrera-May, J. Soler-Balcazar, H. Vázquez-Leal, J. Martínez-Castillo, M. Viguera-Zuñiga, L. Aguilera-Cortés / Sensors (2016). — 16(9). — P. 1359.
14. Murphy, C.A. The Air-FTG™ airborne gravity gradiometer system / C.A. Murphy // Geoscience Australia Record 2004/18: Airborne Gravity 2004: Abstracts from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop. — P. 7–14.
15. Schmidt, P. GETMAG — a SQUID magnetic tensor gradiometer for mineral and oil exploration / P. Schmidt, D. Clark, K. Leslie, M. Bick, D. Tilbrook, C. Foley / Exploration Geophysics (2004) 35. — P. 297–305.

© Бабаянц П.С., Контарович О.Р., Трусов А.А., 2020

Бабаянц Павел Суренович // bab@aerogeo.ru
Контарович Олег Рафаилович // olegk@aerogeo.ru
Трусов Алексей Андреевич // trusov@aerogeo.ru

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.379

Нерадовский Л.Г.¹, Фёдорова Л.Л.² (1 — Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 2 — Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск)

МОДЕЛИ РЕКОНСТРУИРОВАННОГО УЧАСТКА АВТОДОРОГИ «ВИЛЮЙ» В ЯКУТСКЕ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Представлены результаты исследований мерзлых грунтов методом георадиолокации по автодороге «Вилуй» в Якутске. Математическая обработка и статистический анализ кинематических и динамических атрибутов сигналов георадиолокации позволили построить структурную и петрофизическую модели. На их основе описаны главные особенности и детали очень сложного строения итоговой инженерно-геологической модели мерзлого грунтового основания автодороги. Погрешность глубины залегания литолого-фациальных и криогенных (по температуре и льдистости) границ мерзлых грунтов озерно-болотного и аллювиального генезиса в 70 % случаев составила $\pm 0,42$ м.

Ключевые слова: автодорога, мерзлые грунты, скважины, георадиолокация, глубина, время задержки и амплитуда импульсов, коэффициент затухания, модели.

Neradovskiy L.G.¹, Fedorova L.L.² (1 — Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, 2 — Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk)

MODELS OF THE RECONSTRUCTED SECTION OF THE «VILUY» ROAD IN YAKUTSK BASED ON GPR DATA

The results of studies of frozen soils by the GPR on the Viluy road in Yakutsk are presented. Mathematical processing and statistical analysis of the kinematic and dynamic attributes of

*GPR signals allowed the construction of structural and petrophysical models. On the basis of them, the main features and details of the very complex structure of the final engineering and geological model of the frozen ground base of the road are described. The error of the depth of the lithofacies and cryogenic (by temperature and iciness) boundaries of the frozen soils of the lake-swamp and alluvial genesis in 70% of cases amounted to ± 0.42 m. **Keywords:** road, frozen soils, borehole, GPR, depth, delay time and pulse amplitude, attenuation coefficient, models.*

Введение

Ранее в работе Л.Л. Фёдоровой и Г.А. Куляндина были представлены результаты кинематического анализа радарограммы участка реконструируемой автодороги «Вилуй» (далее автодорога) в Якутске с описанием оригинальной методики оценки влажности мерзлых грунтов [11]. В настоящей работе приводятся новые данные по математической обработке радарограммы, которые существенно дополняют результаты георадиолокации по автодороге. Дополнение состоит в рассмотрении структурной и петрофизической моделей грунтового основания автодороги, построенных в пределах слоя годовых теплооборотов. Этот слой, и это нужно отметить, очень важен для решения научно-практических задач инженерной геологии и мерзлотоведения, т.к. в нем непрерывно происходят затухающие с глубиной процессы теплового, механического и иного взаимодействия мерзлых грунтов с фундаментами инженерных сооружений. Результат этого до сих пор слабо изученного взаимодействия записывается и фиксируется в текущем или мониторинговом режиме времени на радарограмме. Однако результат взаимодействия по большей части остается невидимым и недоступным для анализа до тех пор, пока с помощью оригинальной программы «Коефф» [10] или иных программ не будет выполнено динамическое преобразование радарограммы с вычислением коэффициента амплитудного ослабления импульсов сигналов георадиолокации (далее коэффициент k). Пространственное распределение значений коэффициента k , привязанное к данным буровых работ или имеющимся априорным данным по геологии района работ, и представляет собой петрофизическую модель грунтовой или вообще геологической среды. В отличие от статической структурной модели, отображающей по большей части неизменное геометрическое строение и состав грунтовой среды, петрофизическая модель в интегральном виде воплощает в себе всю гамму изменений свойств и состояния грунтовой среды со стороны влияния инженерных сооружений в фиксированный момент времени или в течение всего времени их эксплуатации. Именно этим и ценен предлагаемый подход обязательного динамического преобразования радарограмм с построением петрофизической модели, совместное рассмотрение которой со структурной моделью обеспечивает более полное, а значит, и более достоверное изучение мерзлых грунтовых оснований не только автодорог, но и всех объектов промышленно-гражданского строительства.

Участок работ

Работы методом георадиолокации были проведены в марте 2011 г. на участке автодороги, расположенном на западной окраине Якутска между зданием ГАИ и Хатын-Юряхским шоссе (рис. 1). В геоморфологическом отношении [1] участок работ находится на поверхности второй террасы долины р. Лена (Сергелляхской) вблизи тылового шва высокого левого берега, представляющего собой эрозионно-денудационную равнину, называемую геологами Мыранновой грядой. На границе Сергелляхской террасы с этой грядой расположена полоса озер, стариц и проток разной формы и размеров.

В центральной части участка до глубины 10 м пробурены две опорные инженерно-геологические скважины (далее скважины) с измерением по стволу скважин температуры грунтов и отбором проб грунта на лабораторное определение физико-механических свойств. По данным бурения этих скважин разрез основания автодороги сложен до глубины 0,7–1,0 м насыпными грунтами песчано-гравийного состава. Ниже насыпи автодороги до изученной глубины 10 м залегают мерзлые дисперсные грунты озерно-болотного и аллювиального генезиса. Озерно-болотные фации представлены линзами супесей коричневого цвета и в разной степени засоленными пылеватыми песками с включением органических остатков (торфа, ила) и растительных веществ (детрита). Эти включения встречаются и в незасоленных аллювиальных светло-серых песках мелкой и средней крупности. Во всех случаях включение органики и растительных веществ изменяет цвет песков на темно-серый цвет. Общая мощность мерзлой толщи четвертичных отложений озерно-болотного и аллювиального генезиса на Сергелляхской террасе в большинстве случаев равна 25 м и редко достигает 40 м.

Сравнительно простое литологическое строение разреза автодороги становится сложным и неоднозначным для его изучения георадиолокацией в условиях неравномерного распределения влажности (льдиности) и температуры мерзлых грунтов. По данным скважин С-2 и С-3 изменчивость влажности (льдиности) и температуры по показателю коэффициента вариации соответственно равна 51,6 и 32,7 %. При средних медианных показателях¹ равных 33 % и $-4,0$ °С влажность (льдиность) и температура изменяются от 8 до 84 % и от $-2,2$ до $-6,9$ °С. На забое скважин, т.е. на глубине 10 м значения влажности (льдиности) равны 51,18 %. Температура на этой глубине равна $-4,1$ и $-2,5$ °С. Как видим, изменение основных показателей свойств мерзлых грунтов вдоль трассы автодороги между недалеко расположенными скважинами (на расстоянии 43 м) весьма существенно и, в особенности, для показателя влажности (льдиности).

¹ Медианный показатель при небольших выборках исходных данных, каковыми являются данные измерений температуры и лабораторных определений свойств мерзлых грунтов, дают более точные оценки средних значений исследуемых физических величин.

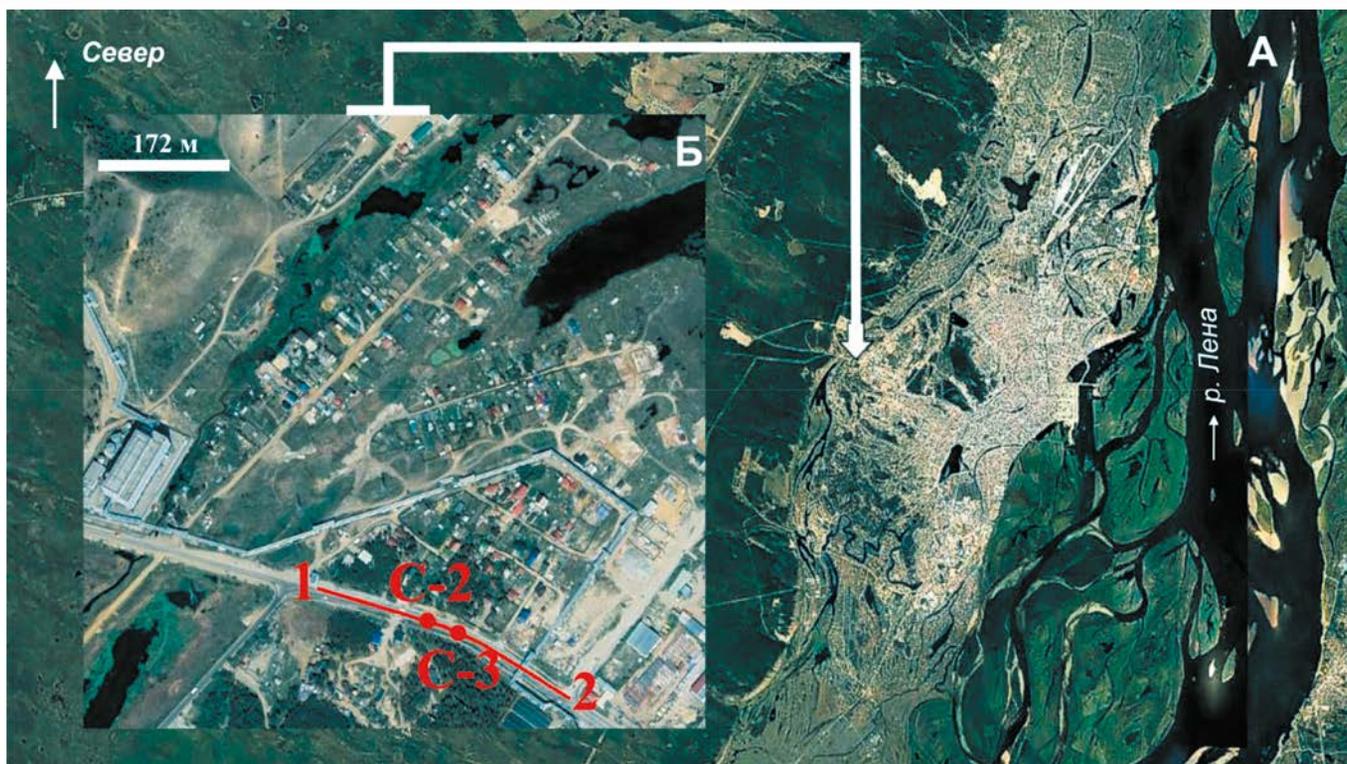


Рис. 1. Общий план местности Якутска (А) и увеличенный фрагмент (Б) участка работ методом георадиолокации на участке автодороги «Вилуй» (красная линия) с точками буровых скважин С-2 и С-3: 1 — здание ГАИ; 2 — Хатын-Юряхское шоссе

Методика георадиолокации

Измерение сигналов георадиолокации выполнялось георадаром «ОКО-2М» по методике обследования 2-х полосных автодорог [7] с антенным блоком АБ-400 с целью детального изучения на частоте 400 МГц грунтового основания автодороги до глубины 5 м. Передающая антенна георадара излучала начальный зондирующий электромагнитный моноимпульс² длительностью в воздухе 2,50 наносекунды (нс). В приповерхностной части автодороги длительность импульса уменьшалась в среднем до 2,35 нс. Приемная антенна регистрировала сигналы георадиолокации до двойного времени задержки 150 наносекунд (далее время задержки). Дискретизация аналоговой записи сигналов георадиолокации по каждой трассе выполнялась по времени задержки с интервалом 0,29 нс. При такой детальной степени разбиения³ каждая трасса сигнала георадиолокации состояла из 512 отсчетов времени задержки импульсов. Амплитуда импульсов измерялась не в вольтах или децибелах, а в дискретах (числе разбиений). Такой способ измерения амплитуды принят у большинства георадаров.

Для транспортировки антенных блоков применялся автомобиль ГАЗ «Соболь» со скоростью движения

² В георадиолокации его принято называть сигналом прямого прохождения.

³ Например, при средней скорости распространения электромагнитной волны по всему разрезу равной 0,134 м/нс измерение амплитуды сигналов георадиолокации будет измеряться по глубине через 2 см.

до 20 км/ч. Антенный блок прикреплялся к автомобилю с помощью специальных лыж. Измерения сигналов георадиолокации проведены в непрерывном режиме в контакте с поверхностью автодороги. Запись сигналов георадиолокации выполнялась по линии профиля, проходящего между точками скважин С-2 и С-3, пробуренных на обочине автодороги. Расстояние между записанными по линии автодороги трассами сигналов составляло 0,108 м. Всего по автодороге длиной 360 м записано 3334 трасс сигналов.

Привязка измерений сделана GPS/ГЛОНАСС приемником с использованием колесного датчика перемещения «ДП-32» и дополнительно с помощью маркерных отметок на радарограмме по столбам линии электрического освещения трассы автодороги. Для измерений и записи сигналов георадиолокации был использован блок обработки и управления (БОУ) в связке с антенным блоком.

Для построения радарограммы и математической обработки сигналов георадиолокации использовалось программное обеспечение «GeoScan32» [9]. Записанная и обработанная радарограммы были внесены в базу данных георадиолокации со списком импортируемых файлов фотографий местности, радарограмм, GPS координат линии записи радарограммы с целью последующего мониторинга изменчивости состояния грунтового основания автодороги [2]. Обработка радарограммы выполнялась по кинематическим и динамическим атрибутам сигналов георадиолокации. Из имеющихся в программе «GeoScan32» модулей математи-

ческой обработки применялись модули (вычитания среднего, медианной фильтрации, деконволюции), которые усиливали амплитудную выразительность и фазовую разрешенность импульсов с целью повышения четкости визуализации радиоотражающих границ.

Кинематическим атрибутом выступало время задержки импульсов, прошедших расстояние от поверхности автодороги до отражающих грунтовых границ и обратно. Динамическим атрибутом выступала мгновенная или текущая амплитуда импульсов в момент их измерения георадаром. Спектральные амплитудно-фазовые характеристики сигналов георадиолокации, которые также принадлежат к динамическим атрибутам, не анализировались.

Структурная модель

Двумерное распределение значений амплитуд вдоль трассы автодороги (по дистанции) и по времени задержки отображает на радарограмме радиофизический образ строения грунтовой среды. По нему и без данных буровых работ нетрудно увидеть и составить правильное представление о строении мерзлого грунтового основания автодороги по таким признакам, как число, местоположение, форма и взаимоотношение радиоотражающих границ. Такой радиофизический образ выражает на радарограмме результат кинематического (скоростного) взаимодействия электромагнитной волны высокой частоты с мерзлыми грунтами автодороги.

Рассмотрим видимый на радарограмме радиофизический образ, как структурную модель автодороги (рис. 2).

Прежде всего отметим, что структурная модель основания автодороги построена в масштаб глубины,

по априорной оценке, средней скорости распространения электромагнитной волны в мерзлых грунтах песчано-глинистого состава, равной 0,134 м/нс. Такая оценка скорости⁴ одинаково приемлема для преобразования радарограмм из масштаба двойной задержки времени в масштаб глубины для территории обширной Центрально-Якутской низменности и Якутска, частью которой он является [8].

При рассмотрении структурной модели обратим внимание лишь на некоторые ее особенности.

Первая особенность — горизонтальные радиоотражающие границы, наблюдаемые в приповерхностной части радарограммы. В целом они отчетливо прослеживаются от здания ГАИ до Хатын-Юряхского шоссе на среднем времени задержки 5 нс (0,34 м). По данным скважин С-2 и С-3 эта часть модели соответствует асфальтобетонному полотну автодороги с пропиткой битумным раствором.

Ниже наблюдаются субгоризонтальные радиоотражающие границы, составляющие вторую особенность модели. По данным скважин С-2 и С-3 границы находятся в слое насыпных грунтов. Поэтому их природа объясняется неравномерным распределением по глубине гранулометрического состава, влажности и плотности гравийно-песчаной смеси, которая неизвестно по какой технологической схеме засыпалась в полотно автодороги во время ее строительства.

Радиоотражающие границы в насыпном слое грунтов отчетливо прослеживаются от здания ГАИ на расстоянии 243 м на времени задержки 12–22 нс (0,80–1,47 м). Далее прослеживаемость границ ухудшается в интервале расстояний 291–317 м. Такой визуальный признак указывает на деформацию насыпи автодороги и связанное с этим интенсивное трещинообразование ее полотна, что и наблюдается при визуальном осмотре автодороги. Обычно такие явления происходят в теплый период года из-за действия в сезонном слое (СТС) процесса фильтрации надмерзлотных вод с вымыванием частиц грунта и криогенного метаморфизма с пересортировкой частиц грунта в холодный период года с полным промерзанием СТС.

Третья особенность структурной модели — насыщенность радиоотража-

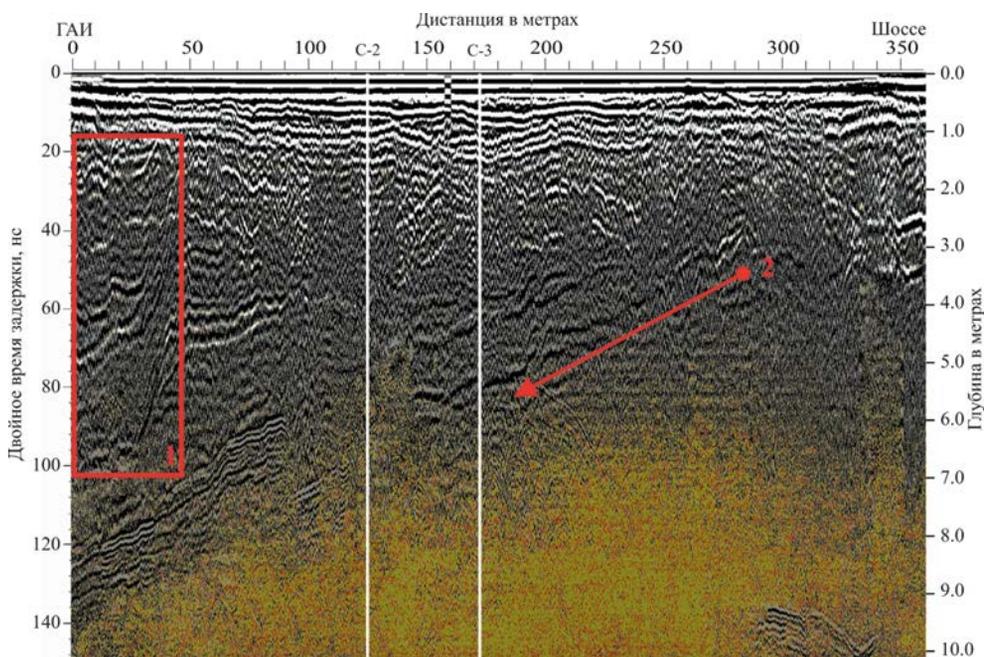


Рис. 2. Радарограмма — структурная модель мерзлого грунтового основания автодороги «ВИЛЮЙ» в Якутске. Пояснения в тексте. 1 — участок погребенной (засыпанной) старицы р. Лена; 2 — начало общего направления наклона границы озерно-болотных отложений с аллювиальными отложениями р. Лена

⁴ Эта скорость соответствует значению вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости (далее проницаемость) равной 5,01 отн. ед.

ющими границами ниже насыпного слоя автодороги до времени задержки 70–108 нс (4,69–7,24 м). В пространственном взаимоотношении границ (по глубине и вдоль оси трассы) трудно увидеть какой-либо порядок, хотя он и существует при детальном рассмотрении радарограммы. Очень сложное строение радиоотражающих границ наследует генетическую природу процесса осадконакопления озерно-болотных отложений, с последующим наложением на образовавшиеся границы ритмических фациальных переходов процесса промерзания с появлением дополнительных границ криогенных текстур грунтов с неравномерным распределением льдистости и засоленности.

По скважине С-3 разрез озерно-болотных отложений⁵ представлен до глубины 6,50 м преимущественно пылеватыми песками с единичными линзами супесей и включениями торфа, ила и детрита. Ниже залегает толща аллювиальных отложений преимущественно в виде песков мелкой и средней крупности с прослоями пылеватых песков. В этой толще также встречаются включения торфа, ила и детрита. По данным георадиолокации важная для понимания общего строения основания автодороги опорная радиоотражающая граница между озерно-болотными и аллювиальными отложениями в точке бурения скважины С-3 находится на времени задержки 80 нс (5,36 м). Как видим, разность между данными бурения скважины и георадиолокации составляет 1,14 м или в относительной метрике равна 19,2 %.

Четвертая особенность структурной модели выражается на радарограмме наклоном границы озерно-болотных и аллювиальных отложений. На рис. 2 эта особенность обозначена стрелкой с указанием места начала наклона и его направления. В направлении здания ГАИ интересующая нас граница начинается на дистанции 283 м на времени задержки 40 нс (глубина 2,68 м) и отчетливо прослеживается до дистанции 172 м на времени задержки 80 нс (глубина 5,36 м) с углом падения 2–3°. Далее, с таким же положим углом граница прослеживается с перерывами до здания ГАИ, погружаясь на глубину 8,04–8,71 м (время задержки 120–130 нс).

Таким образом, минимальная мощность озерно-болотных отложений равна около 3 м вблизи Хатын-Юряхского шоссе, а максимальная мощность, равная около 8–9 м, наблюдается возле здания ГАИ, где основание автодороги переходит с возвышенной поверхности Сергелляхской террасы в понижение рельефа местности — засыпанную старицу р. Лена.

Наконец, остановимся на пятой особенности структурной модели. Эта особенность расположена в верхнем левом углу радарограммы (дистанция 0–48 м) и обозначена контуром красного цвета в интервале времени задержки 16–104 нс (рис. 2). Визуально рассматриваемая особенность выражается в резком смещении всего комплекса радиоотражающих границ

⁵ Они, как известно, создают неблагоприятные инженерно-геологические условия для строительства и эксплуатации инженерных сооружений и, в частности, автодороги «Вилуй».

озерно-болотных отложений, начиная с дистанции 48 м. Плоскость смещения границ наклонена по отношению к поверхности автодороги под углом 15°.

Возникает вопрос о причине образования пятой особенности структурной модели и природе, находящихся в ней радиоотражающих границ. К сожалению, пятая особенность не заверена бурением скважины, и поэтому ответить на поставленный вопрос затруднительно. Тем не менее, вариант объяснения существует, если обратиться к рассмотрению рельефа местности на исследуемом участке автодороги. Как уже говорилось выше, этот участок расположен в примыкании к тыловому шву левобережья долины р. Лена, где развита сеть водоемов. Исходя из этого, пятая особенность с высокой вероятностью принимаемого решения представляет собой часть засыпанной старицы во время строительства автодороги «Вилуй». Правый берег старицы по данным георадиолокации начинается в 48 м от здания ГАИ. Дно старицы сравнительно ровное. В 24 м от здания ГАИ оно залегает на времени задержки 56 нс (глубина 2,68 м), а у самого здания ГАИ — на времени задержки 64 нс (глубина 3,14 м)⁶.

Дно старицы, как и положено по общим законам осадконакопления, покрыто илистыми отложениями до времени задержки 92–104 нс (глубина 5,09–6,05 м), ниже которых залегают песчаные отложения. Структура радиоотражающих границ позволяет предположительно разделить слой илистых отложений на две части. Первая часть представляет близкие к современным молодые или рыхлого сложения, залегающие на времени задержки от 56–64 нс (глубина 2,68–3,14 м) до 68–76 нс (глубина 3,49–4,02 м). Вторая часть представляет более древние, а значит и более литифицированные или, залегающие на времени задержки до 92–104 нс (глубина 5,09–6,05 м). Таким образом, по данным георадиолокации мощность у молодых илистых отложений предположительно равна 0,81–0,88 м. У более древних илистых отложений она больше и равна 1,6–2,03 м.

Петрофизическая модель

Двумерное распределение значений коэффициента затухания амплитуд радиоимпульсов, вычисленных по программе «Коефф» [10], и пересчитанных в значения удельного затухания амплитуды импульсов, отражает на радарограмме ранее невидимую динамическую сторону радиофизического образа грунтовой среды. Такой образ несет сведения о петрофизике мерзлых грунтов, выражает результат энергетического взаимодействия электромагнитной волны с составом, свойствами и состоянием мерзлых грунтов основания автодороги. Петрофизическая модель, построенная в тонном изображении с помощью программы «Surfer8» с нелинейной сеточной интерполяцией способом Kriging, показана на рис. 3.

В отличие от структурной модели петрофизическая модель грунтовой или вообще геологической среды

⁶ За минусом времени задержки 16 нс (мощности асфальтобетонного полотна и насыпной подушки автодороги мощностью 1,07 м).

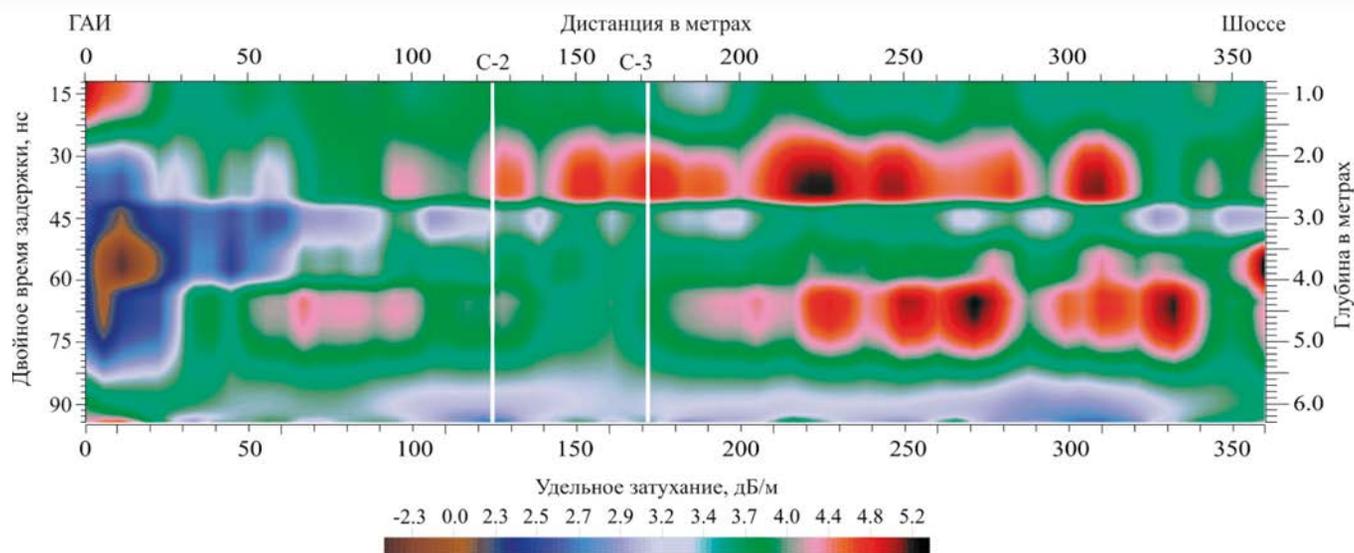


Рис. 3. Радарограмма в динамическом изображении — петрофизическая модель. Пояснения в тексте.

редко привлекает к себе внимание исследователей, занимающихся георадиолокацией, а если и привлекает, то в таких случаях для построения модели применяют программу «Георадар-эксперт» [3]. Этот инструмент математической обработки данных георадиолокации при соблюдении условий его применения⁷ предоставляет широкие возможности в изучении состояний и свойств мерзлых грунтов по двум значениям характеристик. Первой характеристикой предстает вещественная часть комплексной диэлектрической проницаемости. По ней изучается пространственное распределение влажности (льдистости) грунтов, т.е. та характеристика, которая более других геологических характеристик привлекает внимание исследователей криолитозоны России и зарубежных стран. Второй и пока редко применяемой характеристикой выступает добротность грунтов, косвенно описывающая изменчивость затухания электромагнитной волны. Посредством этой характеристики удастся выйти на количественную оценку глинистости, коэффициента фильтрации и засоленности грунтов. Результаты таких петрофизических опытов, полученных в лабораторных условиях, можно найти, например, в публикациях Д.А. Лаломова и В.В. Глазунова [5, 6].

Что касается рассматриваемой петрофизической модели (рис. 3), то она построена, как отмечалось выше, по значениям коэффициента затухания k (нс^{-1}), которые для удобства анализа были пересчитаны в значения удельного затухания (дБ/м). Попутно отметим некоторые подробности вычисления k .

Во-первых, и это главное, за значения k принимался показатель степенной функции, которая лучше экспоненциальной функции⁸ решала задачу вероятност-

ной регуляризации случайных амплитудно-фазовых вариаций импульсов на фоне закономерного уменьшения их амплитуды при росте времени задержки. Во-вторых, оценка значений k выполнялось по всем 3334 трассам сигналов георадиолокации, из которых состояла записанная радарограмма. Параметры длины и сдвига окна анализа по дистанции были равными единице, т.е. значения k оценивались по каждой трассе. Параметр ширины окна анализа по времени задержки подбирался таким образом, чтобы с одной стороны минимизировать ошибку степенной аппроксимации графиков амплитуд импульсов, а с другой стороны с максимально возможной детальностью проследить изменчивость значений k в направлении роста глубины. В итоге удалось построить петрофизическую модель, дающую представление об относительной изменчивости меры затухания электромагнитной волны в зависимости от суммарной (интегральной) изменчивости состава, состояния и свойств мерзлых грунтов в интервале глубины от 0,8 до 6,9 м.

Приступим к рассмотрению петрофизической модели автодороги.

Главной особенностью в ней являются две горизонтально ориентированные полосы с аномально высокими значениями затухания (выше 4,0 дБ/м). Первая полоса, протяженностью 228 м (дистанция 92–320 м), расположена в примыкании к насыпной части автодороги на времени задержки от 24,0–28,5 нс (глубина 1,61–1,91 м) до 40,5 нс (2,71 м). Полоса состоит из 5-и аномалий, протяженностью от 12–32 до 107–140 м и мощностью 1,1–0,8 м. Вторая полоса состоит из 4-х аномалий и залегает на времени задержки 51,0–61,5 и 73,5–79,5 нс (глубина 3,42–4,12 и 4,92–5,33 м). Протяженность и мощность аномалий соответственно равны 10–104 м и 1,21–1,50 м.

По данным скважин С-2 и С-3 природа аномалий затухания неоднозначна. В верхней части разреза природа первой аномальной полосы обусловлена присутствием под насыпью автодороги линз супеси ко-

⁷ Далеко не всегда удается это сделать в реальных условиях записи радарограмм.

⁸ В программе «Коефф» предусмотрены два варианта вероятностной аппроксимации показательными функциями графиков уменьшения амплитуд импульсов по глубине в сигналах георадиолокации: экспоненциальной и степенной функциями.

ричного цвета. Этот цвет свидетельствует о том, что супесь содержит большое количество заторфованных частиц, которые, как известно, являются материнской средой для легкорастворимых солей и связанной незамерзшей воды. Они и являются активными поглотителями энергии электромагнитной волны. В средней части разреза, сложенного озерно-болотными отложениями, природа второй аномальной полосы иная. Рассматривая ее не в строгой локальной замкнутости, а в некоторой переходной зоне со значениями, существенно превышающих фон удельного затухания (выше 3,7 дБ/м), приходим к выводу, что здесь природа роста затухания вызвана присутствием в пылеватых песках⁹ включений органики (торфа, ила) и растительных веществ (детрита). Они в еще большей степени, нежели супеси, насыщены незамерзшей водой и солями. Нередко за счет их присутствия в поровом пространстве минерального скелета грунтов образуются прослойки и линзы в разной степени минерализованных растворов легкорастворимых солей незамерзающих при температуре ниже нуля градусов по Цельсию. Такие образования в мерзлотоведении принято называть криопэгами. В рассматриваемом случае центральные части аномалий с максимальным удельным затуханием (более 5,0 дБ/м) с большой вероятностью можно считать местом присутствия в супесях и пылеватых песках линз межмерзлотных криопэгов мощностью от 0,17 до 0,45 м со средним значением не более 0,3 м¹⁰.

Гистограммный анализ показал, что доля криопэгов, идентифицируемых по значениям затухания более 5,0 дБ/м, составляет 13,8 %. Это немного в численном выражении. Однако вероятная возможность присутствия криопэгов¹¹ в основании автодороги представляет скрытую угрозу для безопасной ее эксплуатации в виде появления на проезжей части непредсказуемых просадок и деформаций.

Из общего строения петрофизической модели следует, что по признаку повышенных значений k (более 3,4 дБ/м) озерно-болотные отложения с включениями органики и растительных веществ, являющихся материнской средой для аномальных поглотителей энергии электромагнитных волн (криопэгов), в целом слагают основание автодороги до 5,7 м (время задержки 85,5 нс). По данным скважин С-2 и С-3 эта граница вскрыта на глубине 5,5 и 6,5 м. Получается, что георадиолокация определяет глубину залегания нижней границы озерно-болотных отложений с ошибкой 0,2 и 0,8 м или в относительной метрике 3,3 и 13,1 %.

На общем фоне петрофизической модели особое внимание привлекает неоднородность со сложной конфигурацией границ, расположенная в левой части

⁹ По размеру частиц они близки к глинистым образованиям (супесям).

¹⁰ По наиболее распространенной в Якутске скорости в криопэгах равной 0,03–0,05 м/нс.

¹¹ В любом случае присутствие криопэгов в мерзлых грунтах создает неблагоприятные условия для строительства и эксплуатации инженерных сооружений как по непредсказуемой изменчивости характеристик свойств криопэгов, так и их местоположения и мощности.

радарограммы. Неоднородность характеризует мерзлые грунты не только со слабым или очень слабым и близким к нулю затуханием электромагнитной волны (3,40–1,15 дБ/м), но даже полным отсутствием ее затухания, сменившим знак плюс на знак минус от $\pm 0,00$ до $-(2,30 \div 3,45)$ дБ/м.

Такие волновые динамические эффекты с ростом, а не уменьшением амплитуды импульсов нередки как в георадиолокации, так и в сейсморазведке. Они образуются вследствие прямого или бокового сильного отражения импульсов от одной или нескольких горизонтальных и наклонных радиоконтрастных границ. Пространственная приуроченность вертикально ориентированной части неоднородности к засыпанной старице р. Лена позволяет сделать вывод о предполагаемой природе радиоконтрастных отражающих границ. Таковыми в этом месте являются границы высокольдистых образований как в виде слоев льда замерзшей воды старицы, так и в виде слоисто-сетчатой текстуры сегрегационного льда в промерзших илистых отложениях. Боковое ответвление от вертикально ориентированной части неоднородности в сторону Хатын-Юряхского шоссе, прослеживающееся на расстояние 22 м с уменьшением мощности от 1,2 до 0,5 м уместно объяснить апофизом зоны теплового влияния на береговую часть подруслового талика старицы. В ходе засыпки старицы и ее постепенного промерзания мерзлые грунты, затронутые боковым растеплением, повысили свою льдистость, что и сказалось на снижении значений k до 2,3–2,5 дБ/м.

Такая важная деталь петрофизической модели является типичной чертой конфигурации подрусловых таликов стариц, проток и озер, во множестве расположенных в Якутске и на прилегающей местности Центрально-Якутской равнины.

Что касается одиночной локальной аномалии затухания с удельным значением более 4,2 дБ/м, расположенной в верхнем левом углу петрофизической модели, то одной из наиболее достоверных предполагаемых причин ее образования являются горюче-смазочные материалы. По мере эксплуатации автодороги со стоянкой автомашин возле здания ГАИ нефтепродукты проникли до глубины 1,5 м и постепенно накопились в насыпном слое автодороги.

Результаты исследований

В результате объединения структурной и петрофизической модели была построена итоговая модель инженерно-геологического строения грунтового основания автодороги. Модель показана на рис. 4 и имеет очень сложное строение. Не повторяясь о том, что было сказано в рубриках структурная и петрофизическая модели, отметим лишь главные черты итоговой инженерно-геологической модели.

В структурном плане сложное строение инженерно-геологической модели наследуется генезисом озерно-болотных отложений с разнообразием сочетания по глубине и латерали литолого-фациальных границ, образованных разными стадиями и ритмами процесса осадконакопления, который происходил на Сергел-

ляхской террасе в примыкании к тыловому шву высокого левого берега долины р. Лена. Из всех наблюдаемых радиоотражающих границ наиболее важной границей для инженерно-геологических построений предстает структурная граница перехода озерно-аллювиальных отложений в толщу аллювиальных отложений со всеми вытекающими следствиями. Одно из таких следствий с точки зрения механики мерзлых грунтов состоит в переходе преимущественно глинистых грунтов (супесей и пылеватых песков с примесями органики и растительных веществ) озерно-болотного генезиса из пластично-мерзлого состояния в нижележащую толщу аллювиального генезиса песков мелкой, средней и крупной зернистости, находящихся в твердомерзлом состоянии. Такая особенность строения чрезвычайно важна для понимания и решения тех организационно-управленческих и инженерных вопросов, от которых зависит долговременная эксплуатация изученного участка автодороги «Виллой». В этом аспекте наиболее важны те проектные решения, которые бы в идеале могли полностью изолировать от поступающего из атмосферы Земли климатического и техногенного тепла основание автодороги, склонное к пластическим деформациям мерзлых грунтов озерно-болотного генезиса. Причем, не только традиционно со стороны полотна автодороги, но и боковых ее примыканий, на что в настоящее время не обращается никакого внимания. Важно и то, что по данным георадиолокации мощность потенциально пластич-

номерзлого слоя озерно-аллювиальных отложений не остается постоянной, а закономерно увеличивается от Хатын-Юряхского шоссе в сторону здания ГАИ от 3 до 8–9 м.

В петрофизическом плане сложность строения инженерно-геологической модели опять же наследуется генезисом грунтов. Однако в этом случае генезис выражается в сложном очертании границ неоднородностей разреза. А именно, состава, состояния и свойств мерзлых грунтов, интегральная изменчивость которых по глубине и латерали регулирует такую же интегральную, но кардинально не повторяемую пространственную изменчивость затухания амплитуды импульсов сигналов георадиолокации. В этом и состоит дополнительная ценность петрофизической информации, делающая результат изучения георадиолокацией грунтового основания автодороги более полным, а значит и более достоверным. Главным же в этой информации выступает знание того, что несмотря на неоднозначное истолкование геологической природы петрофизических неоднородностей и связанных с ними фоновых особенностей и локальных аномалий затухания электромагнитной волны, все они свидетельствуют о присутствии в разрезе участков грунтов в большей или меньшей степени неблагоприятных или благоприятных для эксплуатации автодороги. В первом случае к таковым неоднородностям с повышенным, высоким и аномальным затуханием относятся засоленные супеси и пылеватые пески с включениями органики и меж-

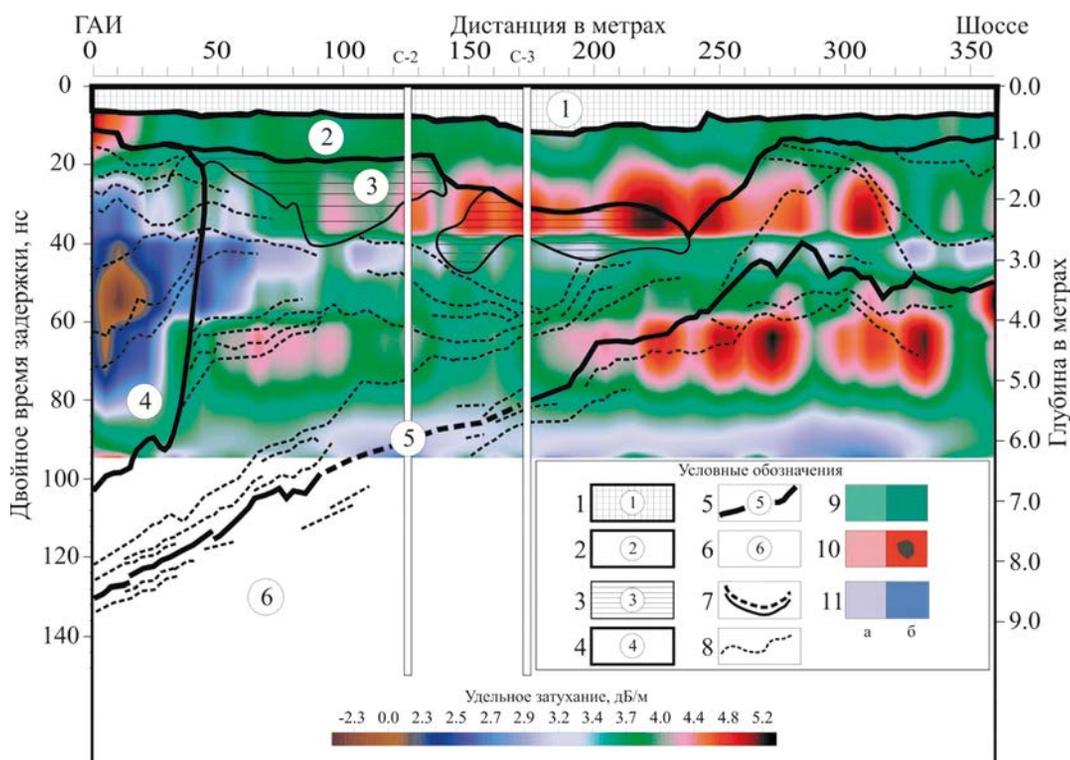


Рис. 4. Инженерно-геологическая модель мерзлого основания участка автодороги «Виллой» в Якутске: 1 — асфальтобетонное полотно с битумным насыщением; 2 — слой насыпных грунтов гравийно-песчаного состава; 3 — линзы супесей; 4 — засыпанная старица р. Лена; 5 — граница озерно-болотных и аллювиальных отложений; 6 — толща аллювиальных отложений; 7 — основные структурные границы, установленные (сплошные линии) и предполагаемые (пунктирные линии); 8 — вспомогательные структурные границы; 9а, б — участки с затуханием выше фоновых значений

3,4 дБ/м — песчаные грунты с включением органики и растительных веществ; 10а, б — участки высокого (выше 4,2 дБ/м) и аномально высокого (выше 4,8 дБ/м) затухания — песчаные грунты с большим содержанием органики и растительных веществ и участки предполагаемых криопэггов; 11а, б — участки твердомерзлых грунтов песчаного состава и льдистые разности песчано-глинистых грунтов

мерзлотными линзами криопэггов. Во втором случае к неоднородностям с пониженным и низким затуханием относятся льдистые разности преимущественно песчаного состава. В этом звене логически распределенной цепочки причинно-следственной связи главным фактором является тепловой импульс, регулирующий фронтально по глубине все теплообменные и криогидрогеохимические процессы, протекающие в слое годовых теплооборотов. Именно поэтому на нескольких горизонтах глубин сформировалась линейно-зональная система неоднородностей мерзлых грунтов, ориентированная в горизонтальном направлении. Как видим, эта важнейшая особенность наблюдается только после динамического преобразования радарограммы. В исходном виде она скрыта под мощным влиянием корреляционного фона радиоотражений.

Статистический анализ разницы глубины залегания грунтовых границ между данными скважин С-2 и С-3 и георадиолокации позволил узнать с какой ошибкой построена инженерно-геологическая модель мерзлого грунтового основания, изученного участка автодороги «Виллой», при использовании априорной оценки¹² средней скорости распространения в слое годовых теплооборотов электромагнитной волны равной 0,134 м/нс.

Тест проверки 33 значений ошибок, сделанный по критериям Колмогорова, Омега-квадрат и Хи-квадрат с помощью программы «STADIA» [4], удостоверяет, что вероятностное распределение ошибок удовлетворяет нормальному закону или закону Гаусса¹³.

Это означает, что по данным георадиолокации глубина залегания как литолого-фациальных, так и криогенных (по температуре и льдистости) грунтовых границ с равной вероятностью завышается или занижается по отношению к данным буровых работ. Значения ошибок варьируют от $-0,9$ до $+0,7$ м. Среднее значение ошибки георадиолокации с доверительной вероятностью 95 % находится в интервале $\pm 0,15$ м. В 70 % случаев значения ошибки находятся в диапазоне $\pm 0,42$ м. В относительной метрике ошибка равна 16,6 %.

Заключение

Математическая обработка данных георадиолокации оказывается плодотворной только в том случае, когда совместно изучаются кинематический и динамический атрибуты сигналов георадиолокации. Результатом такого комплексного изучения на участке, реконструируемой автодороги «Виллой» в Якутске, предстают структурная и петрофизическая модели, по которым, в конечном итоге, была построена инженерно-геологическая модель мерзлого грунтового основания автодороги. Такая модель, привязанная к опорным точкам буровых скважин, с максимально возможной полнотой и детальностью, точностью и

¹² Апостериорная оценка средневзвешенной по глубине скорости распространения электромагнитной волны в мерзлом грунтовом основании автодороги по данным параметрических измерений на скважинах С-2 и С-3 равна $0,125 \pm 0,011$ м/нс

¹³ Так он называется в теории ошибок.

достоверностью передает по данным георадиолокации общие особенности пространственного строения, состава, свойств и состояния мерзлых грунтов.

Такая разноплановая информация важна в 2-х аспектах. В научном аспекте она предоставляет ученым в рамках хоздоговорных работ с производственными предприятиями и бизнес структурами возможность получать новые знания о скоростном и энергетическом взаимодействии электромагнитных волн в пределах слоя годовых теплооборотов в сфере теплового, механического и иного взаимодействия мерзлых грунтов с фундаментами инженерных сооружений. В прикладном аспекте предлагаемый комплексный подход создает физические предпосылки для того, чтобы с приемлемой для практики ошибкой принимать по данным георадиолокации обоснованные решения на стадии проектно-изыскательских работ по оптимальному варианту выбора трассы автодорог и организационно-управленческие и инженерные решения на стадии строительства и эксплуатации автодорог.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гриненко, В.С.* Геологическое строение Большого Якутска / В.С. Гриненко, В.А. Камалетдинов, Ю.Л. Сластенов, О.И. Щербачков // Региональная геология Якутии. — Якутск: Изд-во Якутского гос. ун-та, 1995. — С. 3–20.
2. *Данные мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги* / Л.Л. Фёдорова, К.О. Соколов, Д.В. Саввин, А.С. Стручков // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2016620713, 01.06.2016. Заявка № 2016620386 от 05.04.2016.
3. *Денисов, Р.Р.* Обработка георадарных данных в автоматическом режиме / Р.Р. Денисов, В.В. Капустин // Геофизика. — 2010. — № 4. — С. 76–80.
4. *Кулаичев, А.П.* Методы и средства комплексного анализа данных / А.П. Кулаичев. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2006. — 512 с.
5. *Лаломов, Д.А.* Установление зависимости между минерализацией и добротностью на основе георадиолокационных данных / Д.А. Лаломов, В.В. Глазунов // Георесурсы. — 2017. — Т. 19 (№ 1). — С. 69–77.
6. *Лаломов, Д.А.* Комплексирование методов электротомографии и георадиолокации при решении инженерно-геологических задач на объектах транспортного строительства: дисс... канд. геол.-мин. наук: 25.00.10 / Д.А. Лаломов. М-во образования и науки РФ, С.-Петербург. гор. Ун-т. — СПб., 2017. — 182 с.
7. *Методические рекомендации по применению георадаров при обследовании дорожных конструкций* / Министерство транспорта РФ. Служба дорожного хозяйства РФ (РОСАВТОДОР). — М., 2003.
8. *Нерадовский, Л.Г.* Изучение состояния и свойств мерзлых грунтов и криопэггов методом георадиолокации: дисс... канд. техн. наук: 25.00.08 / Л.Г. Нерадовский; РАН, Сиб. отд-ние, ин-т мерзлотоведения. — Якутск, 2005. — 204 с.
9. *Программа управления георадаром «ОКО-2» и визуализации получаемых данных. Иллюстрированное руководство пользователя. Версия 2.5.* — М.: ООО «ЛОГИС», 2009. — 132 с.
10. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015661470 РФ.* Анализ георадиолокационных данных на основе аппроксимации амплитудных значений степенной функцией / К.О. Соколов, Л.Г. Нерадовский; заявитель и правообладатель ФГБУ науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения РАН. — № 2015618054; заявл. 02.09.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. — 2015. — № 11. — 1 с.
11. *Фёдорова, Л.Л.* Методика георадиолокационной оценки влажности дисперсных горных пород / Л.Л. Фёдорова, Г.А. Куляндин // Наука и образование. — 2017. — № 4. — С. 72–76.

© Нерадовский Л.Г., Фёдорова Л.Л., 2020

Нерадовский Леонид Георгиевич // leoner@mpi.ysn.ru
Фёдорова Лариса Лукинична // Lar-fed-90@rambler.ru