

УДК 550.379

ОПЫТ ИЗУЧЕНИЯ ПРИРОДЫ ПЕРИОДИЧНОСТИ СИГНАЛОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ МЕТОДАМИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

¹Нерадовский Л.Г., ²Фёдорова Л.Л.¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru;²Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, Якутск, e-mail: Lar-fed-90@mail.ru

Рассмотрены результаты применения нескольких методов и компьютерных программ спектрального анализа с целью изучения наличия и геологической природы периодической структуры сигналов георадиолокации. Эти сигналы были записаны георадаром «ОКО-2М» на частоте 400 МГц на участке реконструируемой автодороги в г. Якутске. Методами интегрального преобразования Фурье и методом максимума энтропии, представляющего собой один из вариантов авторегрессионного спектрального анализа, установлено, что сигналы георадиолокации состоят из двух генераций импульсов с разными периодами повторения. Геологическая природа первой генерации импульсов со значениями периодов 0,81–1,26 м обусловлена отражением импульсов от границ основных ритмов осадконакопления песчаных отложений аллювиального генезиса. Природа второй генерации импульсов со значениями периодов 0,40–0,48 м более сложна. С одной стороны, она обусловлена более тонкими фаціальными ритмами или стратиграфическими перерывами в процессе осадконакопления глинистых отложений озёрно-болотного генезиса с формированием в них часто переслаивающихся границ маломощных прослоев растительных осадков и органики в виде ила и торфа. С другой стороны, в этой тонкослоистой литогенной структуре в процессе её длительного промерзания сложнейшим образом сформировалась криогенная структура с границами мёрзлых грунтов, имеющих разную температуру, а также льдистость и засоленность. Всё вместе взятое создаёт благоприятные физические предпосылки для применения метода георадиолокации, как неразрушающего инструмента с целью изучения ритмов осадконакопления в мёрзлых толщах четвертичных отложений. Более того, метод георадиолокации можно использовать при проведении проектно-изыскательских работ с целью идентификации областей или участков развития наиболее тонкослоистых структур. Они, как известно, являются материнской средой для криопеггов и сильнольдистых разностей дисперсных грунтов. В свою очередь эти образования представляют явную или потенциальную угрозу для безаварийной эксплуатации инженерных сооружений.

Ключевые слова: автодорога, мёрзлые грунты, скважины, сигналы георадиолокации, спектральный анализ, частота и периоды импульсов

EXPERIENCE IN STUDYING THE NATURE OF PERIODICITY OF GPR SIGNALS USING SPECTRAL ANALYSIS METHODS

¹Neradovskiy L.G., ²Fedorova L.L.¹Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: leoner@mpi.ysn.ru;²Mining Institute of the North SB RAS, Yakutsk, e-mail: Lar-fed-90@mail.ru

The results of applying several methods and computer programs of spectral analysis are considered with a view to studying the presence and geological nature of the periodic structure of GPR signals. These signals were recorded by the «ОКО-2М» GPR at a frequency of 400 MHz on a section of a reconstructed road in Yakutsk. Using the method of integral Fourier transform and the method of maximum entropy, which is one of the variants of autoregressive spectral analysis, it was found that GPR signals consist of 2 pulse generation with different repetition periods. Geological nature of the first generation of pulses with periods 0.81-1.26 m is due to the reflection of impulses from the boundaries of the basic rhythms of sedimentation of sandy deposits of alluvial genesis. The nature of the second generation of pulses with periods of 0.40-0.48 m is more complex. On the one hand, it is caused by the thinner, facial rhythms or stratigraphic interruptions in the process of sedimentation of clay deposits of wetlands genesis with the formation of often overlapping borders of low-power layers of plant sediments and organic matter in the form of silt and peat. On the other hand, in this thin-layered lithogenic structure, during its long-term freezing, a cryogenic structure was formed in a very complex way with the borders of frozen soils having different temperatures, as well as ice and salinity. All taken together creates favorable physical conditions for the use of GPR method, as a non-destructive tool for studying the rhythms of sedimentation in the frozen strata of Quaternary deposits. Moreover, the GPR method can be used in design and survey works to identify areas of development of the most thin-layer structures. They are known to be the maternal environment for cryopegs and heavily icy of dispersed soils. In turn, these formations represent a clear or potential threat to the trouble-free operation of engineering facilities.

Keywords: road, frozen soils, borehole, GPR signals, spectral analysis, impulse frequency

В настоящей работе на примере участка реконструируемой автодороги «Вилуйский тракт» в г. Якутске описан опыт изучения периодической структуры сигналов георадиолокации. Такие сложные задачи решаются с помощью компьютерных программ, в которых заложен тот или иной метод спектрального анализа. В настоя-

щей работе сравниваются возможности решения обозначенной задачи с помощью разных компьютерных программ. С одной стороны, программ, которые используют классическое интегральное преобразование Фурье, а с другой стороны, не используемой в практике георадиолокации программы авторегрессионного спектрального

анализа, использующей алгоритм метода максимальной энтропии [1, с. 122–144; 2, с. 16–25]. Широко применяемый в настоящее время в георадиолокации метод вейвлет-спектрального анализа в настоящей работе не использован по той причине, что этот метод имеет принципиальные недостатки при изучении сложных периодических структур временных рядов, которые вносят искажения и погрешности в результат спектрального анализа [3]. Другой особенностью настоящей работы выступает ориентированность на поиск наиболее вероятных интерпретационных решений, касающихся геологической природы периодической структуры сигналов георадиолокации, несущих информацию о верхней части криолитозоны. То есть в слое годовых теплооборотов, где происходит взаимодействие мёрзлых грунтов с основаниями инженерных сооружений. Такая особенность с привязкой данных георадиолокации к данным бурения двух проектно-исследовательских скважин делает настоящую работу актуальной не только в области геофизики криолитозоны, но и инженерной геологии, мерзлотоведения.

Участок работ

Работы методом георадиолокации выполнены в 2011 г. на участке реконструируемой автодороги «Вилуйский тракт» в г. Якутске, расположенном между постом ГИБДД и Хатын-Юряхским шоссе. В геоморфологическом отношении участок работ находится на 2-й высокой террасе долины р. Лены (Сергелляхской) вблизи тылового шва левого берега, представляющего собой уступ эрозионно-денудационной равнины, называемой геологами Мыранновой грядой. По современным представлениям, основанным на детальной стратиграфии четвертичных отложений в геоморфологическом строении долины р. Лены, в районе г. Якутска выделена только одна разновысотная надпойменная терраса дриас-голоценового возраста. Её денудационно-аккумулятивная поверхность имеет сложное строение микрорельефа и гидрографической сети (старик, проток, озёр) [4–6].

На границе Сергелляхской террасы с Мыранновой грядой расположена полоса озёр, стариц и проток разной формы и размеров. В центральной части участка работ до глубины 10 м пробурены две скважины С-2 и С-3. Их криогенно-литологический разрез показан на рис. 1. Из него следует, что основание автодороги сложено до глу-

бины 0,7–1,0 м насыпными грунтами песчано-гравийного состава. Ниже до 10 м залегают мёрзлые нельдистые и льдистые грунты песчано-глинистого состава озёрно-болотного и аллювиального генезиса. Озёрно-болотные фации представлены коричневыми супесями и в разной степени засоленными пылеватыми песками с включением органики (торфа, ила) и растительных веществ (детрита). Эти включения встречаются и в незасоленных серых аллювиальных песках мелкой и средней зернистости. Во всех случаях тёмно-серый цвет песков связан с включением органики и растительных веществ. Общая мощность мёрзлой толщи четвертичных отложений озёрно-болотного и аллювиального генезиса на Сергелляхской террасе в большинстве случаев равна 25 м и редко 40 м.

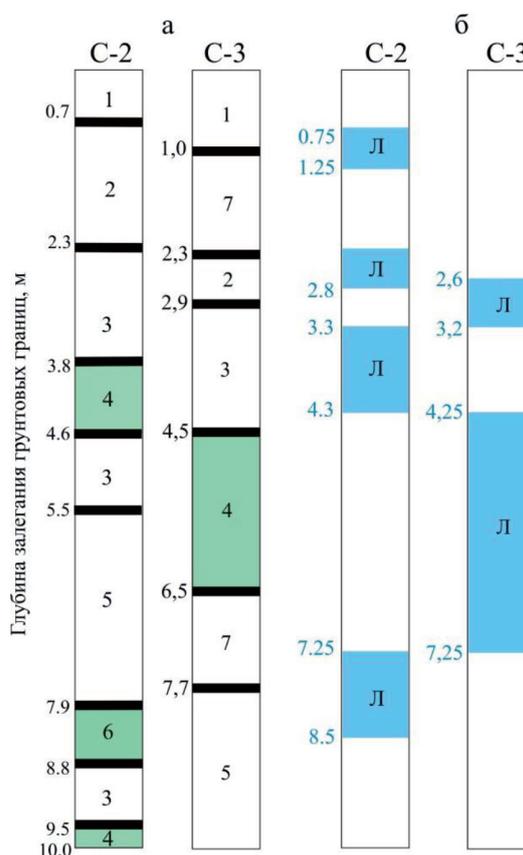


Рис. 1. Геологический разрез скважин С-2 и С-3 на участке автодороги «Вилуйский тракт» в г. Якутске: а, б – литологическая и криогенная колонка скважин. Условные обозначения: 1 – насыпные грунты; 2 – супесь; 3 – песок пылеватый; 4 – пылеватый песок с органикой; 5 – песок мелкий; 6 – песок мелкий с органикой; 7 – песок средний; Л – сильно льдистые грунты с суммарным показателем влажности выше 40%

Простое литологическое строение разреза автодороги осложняется неравномерным распределением льдистости, температуры и других свойств мёрзлых грунтов. По лабораторным данным и геотермии скважин С-2 и С-3 льдистость и температура грунтов изменяются от 8 до 84% и от -2,2 до -6,9 °С при среднем медианном значении 33% и -4,0 °С. Стоит заметить, что медианный показатель среднего при небольших выборках исходных данных, каковыми являются данные измерений температуры и лабораторных определений свойств мёрзлых грунтов всего лишь по двум скважинам, даёт более точные оценки средних значений исследуемых физических величин.

Таким образом, изменение основных показателей свойств мёрзлых грунтов вдоль трассы автодороги между недалеко расположенными скважинами (на расстоянии 43 м) весьма существенно, в особенности для показателя льдистости.

Методика георадиолокации

Измерение сигналов георадиолокации выполнялось в апреле 2011 г. георадаром «ОКО-2М» по стандартной методике непрерывного профилирования двухполосных автодорог [7] с антенным блоком АБ-400 (центральная частота 400 МГц) с целью детального изучения основания автодороги до глубины 5–7 м. Сигналы георадиолокации измерялись до двойного времени задержки 150 наносекунд (далее время задержки). Амплитуда импульсов измерялась в дискретах (числе разбиений). Такой способ измерения принят у большинства георадаров. Для транспортировки антенных блоков применялся автомобиль ГАЗ «Соболь» со скоростью движения до 20 км/ч. Антенный блок прикреплялся к автомобилю с помощью специальных лыж. Измерения сигналов георадиолокации проведены в непосредственном контакте с поверхностью автодороги. Запись сигналов выполнялась по линии профиля, проходящего между точками скважин С-2 и С-3, пробуренных на обочине автодороги. Запись радарограммы внесена в базу данных георадиолокации [8]. Привязка измерений сделана GPS/ГЛОНАСС приемником с использованием колёсного датчика перемещения «ДП-32» и дополнительно с помощью маркерных отметок на радарограмме по столбам линии электрического освещения автодороги. Измерение и запись сигналов георадиолокации выполнены блоком обработки и управления в связке с ан-

тенным блоком. Построение радарограммы и её математическая обработка выполнены с помощью программы «Геоскан 32» [9]. Из имеющихся в программе модулей обработки для усиления чёткости визуализации радиоотражающих границ применялись модули вычитания среднего, медианной фильтрации и деконволюции. Результат такой обработки показан на рис. 2.

Кинематическим атрибутом при обработке радарограммы выступало двойное время задержки импульсов, прошедших расстояние от поверхности автодороги до отражающих грунтовых границ и обратно. Динамическим атрибутом служила мгновенная или текущая амплитуда импульсов в момент их измерения георадаром. На начальном этапе обработки преобразование радарограммы из масштаба времени в масштаб глубины сделано по априорной оценке вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости, равной 5,01. Это значение соответствует обобщённой средней скорости распространения электромагнитной волны (0,134 м/нс) в мёрзлых грунтах песчано-глинистого состава, слагающих Центрально-Якутскую низменность [10]. Частью этой низменности является долина р. Лены «Туймаада», где построен г. Якутск.

Для расчёта значений периодов чередования импульсов в сигналах георадиолокации применялась апостериорная оценка средневзвешенной (по мощности грунтовых слоёв) скорости 0,150 м/нс. Эта оценка получена до глубины 10 м по данным анализа физико-геокриологической модели автодороги «Виллойский тракт», построенной по данным скважин С-2 и С-3 и обработанным данным георадиолокации.

Спектральный анализ окрестности скважин

Цель спектрального анализа – дать ответ на вопрос, есть ли периодическая составляющая в следовании импульсов по глубине, и в случае положительного ответа попытаться установить природу периодичности. Рассмотрим результаты спектрального анализа сигналов георадиолокации с применением разных компьютерных программ цифровой обработки временных рядов: «Statistica 6», «Мезозавр», «BURG», «Стадия».

Исходя из лучевых представлений, заимствованных из законов геометрической оптики сконцентрированный по энергии отклик геологической среды на упругое или электромагнитное взаимодействие

формируется в пределах границ 1-й зоны Френеля [11, с. 101]. Опыт работы в криолитозоне показал, что помехоустойчивость отклика и чистота его приёма антенной георадара существенно увеличивается за счёт дополнительного зашумления случайно фазированных импульсов путём измерений в пределах суммарного радиуса 1–2-й зоны Френеля. Такой подход находится в полном согласии с теоретическими представлениями о цифровой обработке стохастических сигналов [2] и, в частности, сигналов георадиолокации [12; 13]. По отмеченной выше причине исходными данными для спектрального анализа служили не единичные трассы сигналов георадиолокации, а их группа, собранная в окрестности опорных точек скважин в пределах границ 1–2 зоны Френеля. При максимальной глубине бурения скважин 10 м и средней длине зондирующего импульса 0,32 м (иначе его называют сигналом прямого прохождения) радиус 1–2 зон Френеля равен 2,50 м. При таком радиусе и расстоянии между трассами 0,108 м слева и справа от точек скважин С-2 и С-3 было собрано по 12 трасс. По каждой трассе с помощью программы «Koeff» [14] произведена выборка импульсов с относительными максимумами амплитуды импульсов в положительной фазе

вступления, т.е. в фазе нарастания значенной амплитуды.

Рассмотрим результаты спектрального анализа по каждой апробированной компьютерной программе с иллюстрацией графиков спектральной плотности сигналов георадиолокации на рис. 3. Расчёт периода следования импульсов сигналов георадиолокации по глубине сделан по средневзвешенной скорости 0,150 м/нс.

Программа «Statistica 6». Эта широко известная зарубежная программа выполняет спектральный анализ временных или пространственных рядов классическим методом быстрого дискретного интегрального преобразования Фурье. В рассматриваемом случае преобразование выполнено со сглаживающим фильтром Хемминга. Присутствие на графике спектра (рис. 3) двух максимумов удостоверяет о присутствии в сигналах георадиолокации двух периодических генераций импульсов. Одна из них с пикообразным максимумом спектра является доминирующей по энергии. В ней импульсы следуют друг за другом через 0,65 м в окрестности скважины С-2 и через 0,78 м в окрестности скважины С-3. Аналогичным образом во второй генерации с небольшим, но статистически значимым максимумом импульсы следуют друг за другом через 0,32 и 0,39 м.

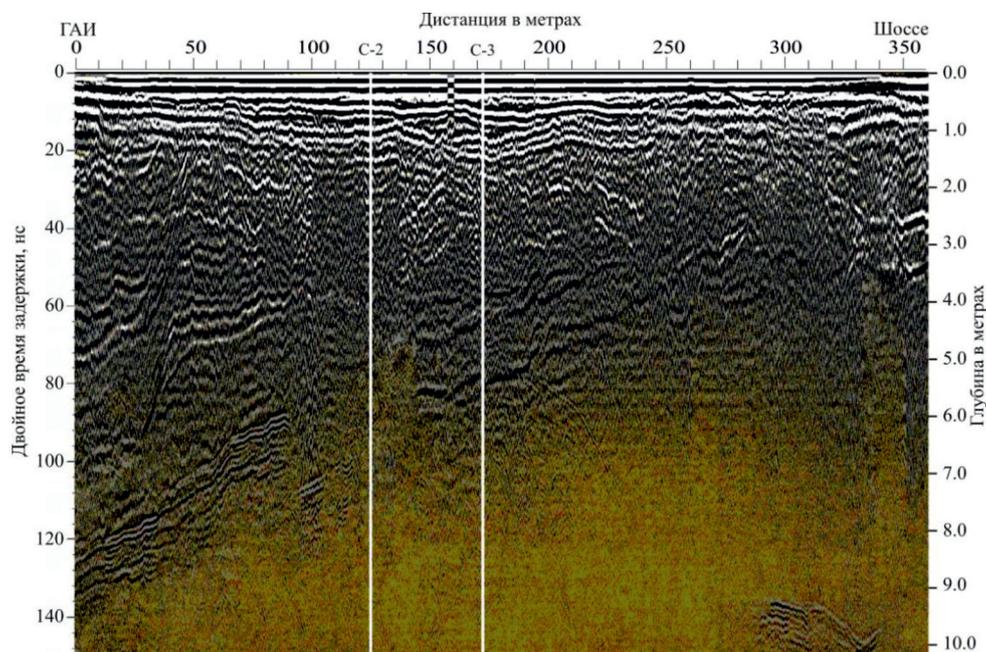


Рис. 2. Радарограмма мёрзлого основания автодороги «Вилуйский тракт» в г. Якутске на начальном этапе математической обработки

Программа «Мезозавр». Эта программа входила в пакет программ по прикладному статистическому анализу, разработанному в 1980–1990-х гг. Центральным экономико-математическим институтом (ЦЭМИ, г. Москва) под руководством С.А. Айвазяна. В настоящее время программа «Мезозавр» стала практически недоступной для научного и инженерного сообщества, да и пользоваться ею в период стремительного развития современной компьютерной техники стало затруднительно. Тем не менее, находясь в личном пользовании первого автора настоящей статьи, программа успешно продолжает работать в операционной системе Windows XP.

В отличие от программы «Statistica 6», программа «Мезозавр» выполняет спектральный анализ методом интегрального преобразования Фурье посредством расчёта автокорреляционной функции сигналов георадиолокации. Результаты спектрального анализа представлены на рис. 3 в виде фотографий спектров, сделанных с экрана ноутбука, во время текущего сеанса работы программы «Мезозавр». Графики спектров опять же свидетельствуют о присутствии в сигналах георадиолокации двух периодических генераций импульсов с явным доминированием более длиннопериодной генерации. Эта генерация выражается максимальным значением энергии (пиком спектра) с одинаковым периодом следования импульсов в окрестности скважин С-2 и С-3 равным 0,81 м. Короткопериодная генерация импульсов с небольшим максимумом спектра имеет в два раза меньший и также одинаковый в окрестности скважин С-2 и С-3 период следования импульсов равный 0,40 м.

Программа «BURG». Эта программа реализует сложный для понимания метод максимальной энтропии, предложенный в конце 1960-х – начале 1970-х гг. И.П. Бургом. Программа написана в 1991 г. на языке TURBO-PASCAL для операционной системы DOS программистом Якутского треста инженерно-строительных изысканий (ЯкутТИСИЗ) О.Ю. Евсеевой для решения задач георадиолокации с одним из первых образцов отечественной георадарной техники 17ГРЛ-1. С алгоритмом программы можно ознакомиться в работе Канасевича [1, с. 132–134]. Достоинство программы «BURG» состоит в получении спектров высокого разрешения по коротким временным рядам. Однако, как показывает долговременный опыт использования программы «BURG» в ЯкутТИСИЗ, серьёзным

её недостатком нужно признать трудность правильного выбора числа итераций, необходимого для вычисления оптимального числа коэффициентов фильтра предсказания. В конечном итоге этот методический недостаток оборачивается неоднозначной идентификацией периодической структуры временного ряда.

В рассматриваемом случае проблем с неоднозначностью идентификации не возникает в части признания достоверности присутствия в сигналах георадиолокации короткопериодной спектральной компоненты с чередованием импульсов в окрестности скважин С-2 и С-3 через 0,52 и 0,33 м. Эта компонента проявляет себя пиковым максимумом (рис. 4) среди всех остальных компонент, представляющих собой спектральные шумы.

В локальном масштабе, используя приём увеличительного стекла, контрастной и статистически значимой длиннопериодной компонентой в окрестности скважины С-2 также следует признать компоненту с периодом 1,04 м (фрагмент спектра на рис. 4, а). Аналогичная компонента в окрестности скважины С-3 (фрагмент спектра на рис. 4, б) с периодом 0,95 м фиксируется хорошо разрешённым, контрастным слабым по амплитуде максимумом.

Программа «Стадия». Эта программа разработана А.П. Кулаичевым [15] и так же, как программы «Statistica 6», «Мезозавр», выполняет спектральное разложение сигналов георадиолокации на гармонические составляющие методом интегрального преобразования Фурье. Спектральный анализ периодической структуры сигналов георадиолокации выполнялся программой «Стадия» в двух вариантах: без устранения и с устранением из сигналов георадиолокации тренда в виде закономерного уменьшения амплитуды импульсов с ростом времени задержки. Устранение тренда выполнялось автоматически операцией нормирования значений амплитуд импульсов к нулевому среднему. Сравнение полученных результатов расчёта спектров, показывает, что они одинаковы, как в присутствии, так и в отсутствии тренда в сигналах георадиолокации. Отметим, что спектральный анализ с помощью программ «Statistica 6», «Мезозавр», «BURG» выполнялся без устранения обозначенного тренда из сигналов георадиолокации.

Из рис. 3 видно, что в окрестности скважин С-2 и С-3 присутствуют пиковые максимумы спектральной плотности, ука-

зывающие на доминирование в сигналах георадиолокации мощной периодической генерации импульсов с одним и тем же пе-

риодом равным 0,81 м. Другая генерация менее энергична, но также имеет одинаковый период равный 0,40 м.

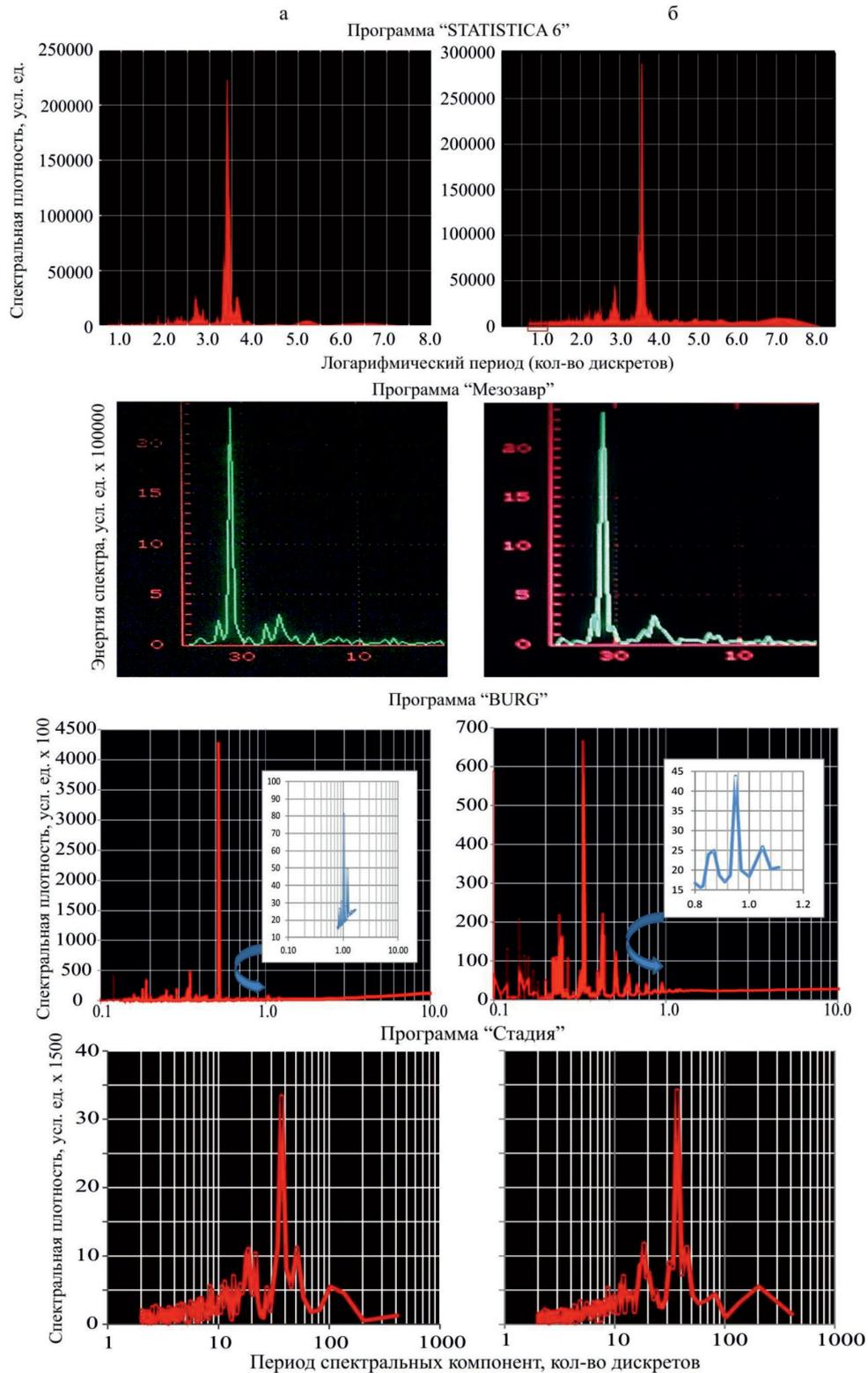


Рис. 3. Графики спектральной плотности распределения импульсов в сигналах георадиолокации, собранных в окрестности скважин: а) скважина С-2; б) скважина С-3

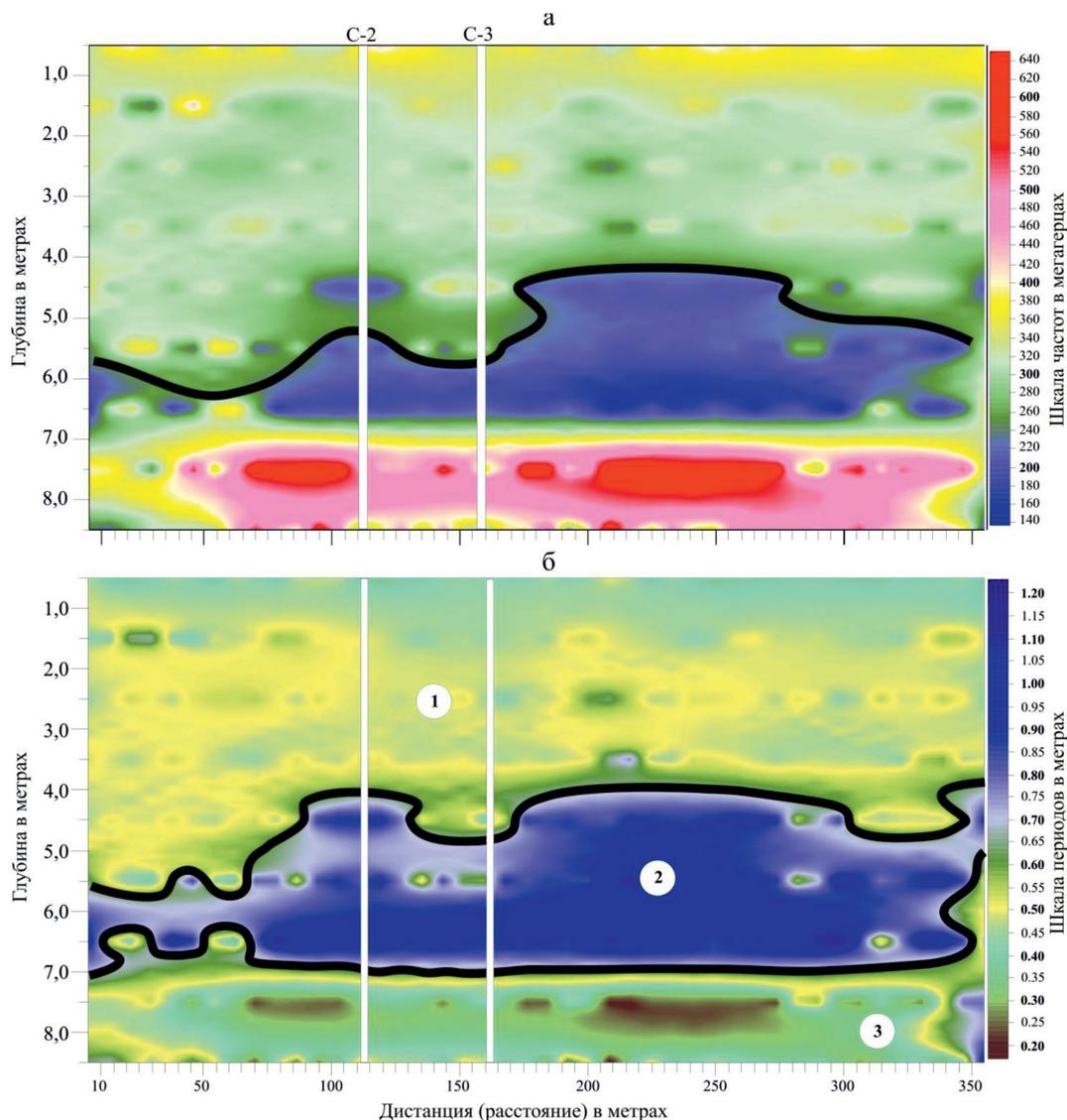


Рис. 4. Разрез значений частоты (а) и периодов импульсов (б) в сигналах георадиолокации на участке автодороги «Вилуйский тракт»: 1 – толщина озёрно-болотных отложений; 2 – толщина аллювиальных отложений с преобладанием песчаного материала мелкой и средней зернистости; 3 – то же, с включением пылеватых песков

Спектральный анализ радарограммы

Цель анализа – понять природу особенностей изменения в мёрзлых грунтах частотного состава сигналов георадиолокации и связанного с ним изменения периода временных рядов импульсов вдоль исследуемого участка автодороги «Вилуйский тракт» и по глубине. Анализ выполнялся с помощью программы «Геоскан32», разработанной группой компаний ЛОГИС (г. Жуковский) и ГЕОТЕХ (г. Москва) [9].

Спектральный оконный анализ с определением частотных характеристик сигналов георадиолокации и построением их гра-

фиков выполнялся на интервалах глубин: 0–1, 1–2, 2–3, ... , 8–9 м. На каждом интервале окно анализа длиной 10 м перемещалось ручным способом вдоль радарограммы с шагом 10 м. К сожалению, автоматизированное перемещение окна анализа в программе «Геоскан 32» не предусмотрено.

Результат спектрального оценивания присваивался к середине окна анализа. Полученные с помощью программы «Геоскан 32» результаты оконного спектрального анализа были построены в виде тоновых цветных разрезов частоты и периодов с помощью программы «Surfer-8» (рис. 4).

На рис. 4, а, отчётливо видна зональность частоты сигналов георадиолокации по глубине. Сверху вниз частота уменьшается. В верхней части разреза до глубины 1,0–1,5 м частота в насыпных грунтах песчано-гравийного состава равна 340–380 МГц. Ниже в обширной части разреза до глубины 4,5–6,5 м, где по данным бурения скважин расположена главная структурная литогенная граница (она показана утолщённой кривой чёрного цвета) глинистых озёрно-болотных и песчаных аллювиальных отложений, частота постепенно, но существенно снижается до 300–220 МГц. Граница смены генезиса и состава грунтов вскрыта в точках скважин С-2 и С-3 на глубине 5,3 и 6,5 м. По данным частотного анализа эта граница расположена на глубине 5,3 и 5,8 м. Разница между бурением скважин и георадиолокацией в относительных единицах составляет 3,6 и 14,4%.

В песчаных аллювиальных отложениях, залегающих в целом до глубины около 7 м, частота снижается до минимальных значений 220–140 МГц. Появление таких сравнительно низких частот связано не с высоким поглощением энергии электромагнитной волны в мёрзлых песках, а существованием в них фациальных границ разной зернистости (преимущественно мелкой и средней), чередующихся через 0,7–1,2 м (рис. 4, а).

Инверсия частот с ростом до 400–640 МГц наблюдается в нижней части разреза в толще мёрзлых грунтов песчаного состава на строго выдержанной глубине около 7 м. Такое интересное явление с неравномерным, но упорядоченным распределением частот в горизонтальном направлении вряд ли обусловлено технической причиной, например шумами и помехами в приёмно-измерительном канале георадара. Вероятнее всего, причина высоких частот заключена в прерывистом процессе осадконакопления песчаного материала на Сергелляхской террасе в примыкании к тыловому шву высокого левого берега долины р. Лены. В результате такой геоморфологической особенности в переходной зоне ниже границы глинистых отложений озёрно-болотного генезиса сформировалась неоднородная песчаная толща по петрографическому и гранулометрическому составу. Строение этой толщи более упорядоченно и понятно на рис. 4, б.

Верхняя часть песчаной толщи в точках бурения скважин С-2 и С-3 сложена песчаным материалом в виде серых песков мелкой и средней зернистости. Верхняя грани-

ца толщи на рис. 4, б, залегает на глубине 4,0–4,8 м. По отношению к данным скважин положение границы в разрезе определяется с большей погрешностью (31,6 и 30,1%), нежели на рис. 4, а.

Нижняя граница песчаной толщи по данным георадиолокации залегает на глубине около 7 м. Положение этой границы по визуальному описанию геологического разреза скважин однозначно не установлено. Судя по однородности значений сравнительно длиннопериодных импульсов (рис. 5, б), пески мелкой и средней зернистости в целом хорошо отсортированы, а их границы сложным образом чередуются в основании изученного участка автодороги «Вилуйский тракт» с интервалом 0,9–1,2 м.

В нижней части песчаной толщи чистота сортировки песчаного материала нарушается. В нём, как это следует из смены длиннопериодных на короткопериодные импульсы (менее 0,4 м), появляется тонкослоистая структура в виде песчаных слоёв с глинистыми частицами (пылеватые пески) и прослоек илисто-торфяного материала с включениями растительных веществ. Будучи насыщены водой, они в процессе последующего длительного промерзания превратились в льдистые образования со слоистой криогенной текстурой. По данным анализа значений периодов импульсов мощность льдистых прослоек в мёрзлых грунтах песчаного состава приблизительно оценивается в 20–30 см (рис. 5, б).

Результаты исследования и их обсуждение

Объединим полученные разными компьютерными программами результаты спектрального анализа в окрестности точек скважин С-2 и С-3 и в целом по всей радарограмме, записанной на изученном участке автодороги «Вилуйский тракт». Однако прежде рассмотрим результаты гистограммного анализа значений периодов импульсов на всём участке автодороги. Из этого рассмотрения следует, что общая совокупность значений периодов импульсов состоит из двух групп. Вероятностное распределение значений периодов в первой группе описывается смесью двух законов: равномерного и нормального. Вероятностное распределение значений периодов во второй группе проще и описывается одним логнормальным законом. Групповые описательные статистики значений периодов представлены в табл. 1. Несмотря на несоответствие нормальному закону вероят-

ностных распределений периодов значения их средних показателей близки друг к другу. Наиболее точным из них следует признать показатель модального среднего, т.е. значения, которое наиболее часто встречается в совокупности исходных данных. Такими значениями для первой и второй группы являются значения периодов 0,48 и 1,26 м.

Таблица 1

Описательная статистика значений периодов в сигналах георадиолокации по данным спектрального анализа радарограммы

Период импульсов, метры	1 группа	2 группа
Среднее арифметическое (САР)	0,46	1,34
Медианное среднее	0,47	1,31
Модальное среднее	0,48	1,26
Стандартное отклонение	0,113	0,219
Коэффициент вариации, %	24,7	16,3
Минимум	0,18	0,93
Максимум	0,77	2,78
Количество определений	427	80
Уровень доверия САР (95%)	0,011	0,049

Обобщающая статистика значений периодов импульсов сигналов георадиолокации в окрестности точек скважин С-2, С-3 и по радарограмме (всему изученному участку автодороги «Вилуйский тракт») представлена в табл. 2. Из неё следует, что частные средние оценки значений периодов, полученные в окрестности скважин с помощью программ «Statistica 6», «Мезозавр», «BURG», «Стадия», и общая оценка средних значений периодов, полученная по радарограмме с помощью программы «Геоскан 32», близки друг к другу. В 1-й пе-

риодической генерации импульсов разница между частной и общей оценкой средних значений составляет 0,45 м, а во второй – 0,08 м. В относительных единицах разница соответственно равна 43,5 и 18,2%.

Большое различие оценок для 1-й генерации говорит о том, что в окрестности скважин, т.е. в локальном масштабе, эта генерация имеет существенно меньший период, нежели в масштабе всей радарограммы. Иначе говоря, локальная оценка среднего значения периода 1-й генерации не является репрезентативной по отношению к общей оценке. Напротив, небольшое различие оценок для 2-й генерации свидетельствует о репрезентативности локальной оценки среднего значения периода.

Рассмотрим вопрос о геологической природе 1 и 2 периодических генераций в сигналах георадиолокации, опираясь на данные бурения скважин С-2 и С-3. Статистический анализ значений мощности мёрзлых грунтов, вскрытых этими скважинами, показывает, что их вероятностное распределение не подчиняется нормальному закону и описывается логнормальным законом. Руководствуясь этим фактом, оценим среднюю мощность слоёв по модальному показателю. В соответствии с ним средняя мощность, а значит, и среднее значение периода повторения грунтовых границ равно 0,83 м.

Описание разреза скважин С-2 и С-3 свидетельствует, что такими границами предстают литолого-фациальные границы, т.е. границы переслаивания грунтов глинистого и песчаного состава, слагающие мёрзлую толщу четвертичных отложений озёрно-болотного и аллювиального генезиса.

Таблица 2

Сводная статистика значений периодов в сигналах георадиолокации по данным спектрального анализа в окрестности скважин С-2 и С-3 и по всей радарограмме

Программы спектрального анализа	Периоды 1 генерации импульсов в метрах		Периоды 2 генерации импульсов в метрах	
	С-2	С-3	С-2	С-3
Statistica 6	65	78	32	39
Мезозавр	0,81	0,81	0,40	0,40
BURG	1,04	0,95	0,52	0,33
Стадия	0,81	0,81	0,40	0,40
Среднее медианное значение в окрестности скважин С-2 и С-3	0,81	0,81	0,40	0,40
Геоскан 32 Среднее модальное значение по всей радарограмме	1,26		0,48	

Таким образом, квазипериодическая структура литолого-фациальных границ порождает такую же квазипериодическую структуру потока отражённых импульсов, наблюдаемых в сигналах георадиолокации. Разность оценок в периодах чередования в разрезе скважин литолого-фациальных границ (0,83 м) и импульсов в сигналах георадиолокации (0,81 м) незначительна и равна 0,02 м или 2,4%.

Посмотрим, насколько согласуется общая оценка среднего значения периода 1-й генерации импульсов (1,26 м) на участке записи радарограммы с аналогичным значением периода чередования литолого-фациальных границ разреза за пределами границ этого участка, где были пробурены ещё шесть проектно-изыскательских скважин.

С дополнением данных по этим скважинам среднее значение мощности или периода чередования упомянутых границ при оптимальном разбиении исходных данных, подготовленных для гистограммного анализа в программе «Стадия», принимает наиболее вероятное значение равное 1,10 м. Разница со средним значением периода 1-й генерации импульсов (1,26 м) невелика и равна 0,16 м или 13,6%.

Установить геологическую природу 2-й периодической генерации импульсов в точности невозможно по данным бурения не только скважин С-2 и С-2, но и других скважин, пробуренных на сопредельной территории Сергелляхской террасы в пределах реконструируемой автодороги «Виллюйский тракт». Тем не менее, опираясь на анализ лабораторных данных физико-механических свойств мёрзлых грунтов, отобранных по стволу скважин, можно с некоторой долей уверенности предположить, что геологическая природа 2-й периодической генерации импульсов порождена очень сложным сочетанием границ изменения льдистости и засоленности мёрзлых грунтов. К сожалению, существующая в инженерно-геологических изысканиях схема технологии бурения скважин с неравномерным избирательным отбором проб грунтов из каждого литологического слоя, препятствует точному определению мощности прослоев и линз льдистых и засоленных грунтов (криопэгов), а значит, и определению интервала чередования границ таких грунтов.

Таким образом, по результатам спектрального анализа периодической структуры сигналов георадиолокации и идентификации их геологической природы

с привязкой к данным бурения проектно-изыскательских скважин сделаем несколько выводов.

Во-первых, с точки зрения теории системного анализа при электромагнитном возбуждении антенной георадара «ОКО-2М» с центральной частотой спектра 400 МГц в мёрзлом основании исследуемого участка автодороги «Виллюйский тракт», сложенного дисперсными грунтами песчано-глинистого состава, образуется интегральный отклик в виде двух периодических генераций импульсов. Первая генерация со средними значениями периода 1,26–1,34 м связана с процессом осадконакопления и формируется литолого-фациальными границами глинистых грунтов озёрно-болотного генезиса и песчаных грунтов аллювиального генезиса. Вторая генерация со средними значениями периода 0,46–0,48 м обусловлена процессом промерзания осадочной толщи четвертичных отложений. В результате формируется тонкослоистая структура границ с чередованием слоёв и прослоев грунтов разной льдистости и температуры, а также границ слоёв в разной степени засоленных глинистых грунтов с включением органики, являющихся, как известно, материнской средой для образования межмерзлотных криопэгов.

Во-вторых, появляется возможность оценивать мощность и долю прослоев грунтов, которые в той или иной степени создают неблагоприятные инженерно-геологические условия для строительства и эксплуатации инженерных сооружений. В рассматриваемом случае такими опасными образованиями являются прослой льдистых грунтов и криопэгов. Их мощность (идентифицируемых по минимальным значениям периода импульсов в сигналах георадиолокации), как это следует из результатов детального гистограммного анализа, равна 0,20–0,41 м, а общая доля в основании изученного участка автодороги «Виллюйский тракт» достаточно велика (23,1%).

В-третьих, метод интегрального преобразования Фурье, реализуемый с помощью таких программ спектрального анализа, как «Statistica 6», «Мезозавр», «Стадия», является эффективным инструментом выделения в сигналах георадиолокации длиннопериодной генерации последовательности импульсов, отражённых от литолого-фациальных границ мёрзлых дисперсных грунтов.

В-четвёртых, метод максимальной энтропии, реализуемый с помощью программы «BURG», является тонким инстру-

ментом спектрального анализа сигналов георадиолокации с чётким выделением доминирующей короткопериодной генерации импульсов, отражённых от границ свойств и состояния мёрзлых дисперсных грунтов.

В-пятых, наиболее универсальной среди рассмотренных программ, реализующих метод интегрального преобразования Фурье в варианте оконного спектрального разложения сигналов георадиолокации, является программа «Геоскан 32». Она одинаково легко выявляет все существующие в сигналах георадиолокации периодические генерации импульсов, отражённых от любых границ мёрзлых дисперсных грунтов.

Заключение

Спектральный анализ показал, что не во всех случаях ритмический рисунок записанных сигналов георадиолокации, наблюдаемых на осциллограммах или радарограммах, бывает обусловлен кратными отражениями импульсов от одной или нескольких радиоконтрастных геологических границ. Поэтому прежде, чем заниматься фильтрацией периодических импульсов, рекомендуется изучить их геологическую природу.

Привязка результатов спектрального анализа к данным буровых работ позволила изучить геологическую природу двух периодических генераций импульсов сигналов георадиолокации. Доминирующей по величине энергии оказалась 1 генерация с периодом следования импульсов равным 0,81–1,26 м. Эти импульсы отразились от границ основной литолого-фациальной ритмической структуры. Она сложена грунтами песчано-глинистого состава, слагающих до глубины 10 м верхнюю часть мёрзлой толщи четвертичных отложений озёрно-болотного и аллювиального генезиса.

Существенно меньшая по энергии 2 генерация импульсов с периодом 0,40–0,48 м сформирована предположительно тонкослоистой структурой границ маломощных прослоев, прослоек и линз льдистых и засоленных мёрзлых грунтов, включая минерализованные рассолы, незамерзающие при температуре ниже нуля Цельсия (криопэги).

С точки зрения науки полученные результаты спектрального анализа важны, как новые знания в области изучения реакции мёрзлых грунтов в слое годовых теплооборотов на импульсное высокочастотное электромагнитное возбуждение георадарной техникой с поверхности Земли. В приклад-

ном, но также научном аспекте полученные результаты предлагается рассматривать как частное доказательство благоприятных физических предпосылок применения метода георадиолокации как тонкого и достоверного неразрушающего инструмента с целью изучения ритмической структуры мёрзлых четвертичных отложений, слагающих долину р. Лены и обширную Центрально-Якутскую низменность. Это одно из перспективных направлений развития метода георадиолокации в инженерной геологии и мерзлотоведении, обозначенное в работе А.В. Старовойтова и названного изучением георадарных седиментационных комплексов и фаций [16, с. 35–48]. Актуальность этого направления подтверждается в работе М.С. Судаковой и М.Л. Владова в аспекте решения задачи картирования границ льдистых грунтов [17, с. 7].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-45-140061 p_a).

Список литературы / References

1. Канасевич Э.Р. Анализ временных последовательностей в геофизике. Перевод с англ. В.Н. Лисина. Редактор перевода докт. техн. наук О.А. Потапов. М.: Недра, 1985. 300 с.
Kanasewich E.R. Time sequence analysis in geophysics. Third edition. The University of Alberta Press, Edmonton, Alberta, 1981. 492 p.
2. Никитин А.А. Статистические методы выделения геофизических аномалий. М.: Недра, 1979. 280 с.
Nikitin A.A. Statistical methods for detecting geophysical anomalies. M.: Nedra, 1979. 280 p. (in Russian).
3. Кулаичев А.П. Критика вейвлет-анализа электроэнцефалограмм (ЭЭГ) // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 12–1. С. 47–57.
Kulaichev A.P. Criticism of wavelet analysis of electroencephalograms (EEG) // Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk. 2016. № 12–1. P. 47–57 (in Russian).
4. Спектор В.Б., Шестакова А.А., Торговкин Я.И., Спектор В.В., Иванова Л.Д. Инженерно-геологическая карта Республики Саха (Якутия) // Материалы XI Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения, г. Магадан (Россия), 5–8 сентября 2017 г.: тезисы докладов. Якутск: Изд. ФГБУН «Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2017. С. 320–321.
Spektor V.B., Shestakova A.A., Torgovkin Ya. I., Spektor V.V., Ivanova L.D. Engineering and geological map of the Republic of Sakha (Yakutia) // Materialy XI Mezhdunarodnogo simpoziuma po problemam inzhenernogo merzlotovedeniya, g. Magadan (Rossiya), 5–8 sentyabrya 2017 g.: tezisy докладov. Yakutsk: Izd-vo FGBUN «Institut merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2017 P. 320–321 (in Russian).
5. Спектор В.Б., Торговкин Я.И., Шестакова А.А., Чжан Р.В., Спектор В.В. Инженерно-геокриологическое районирование территории Республики Саха (Якутия) // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 28–37.
Spektor V.B., Torgovkin Ya.I., Shestakova A.A., Chzhan R.V., Spektor V.V. Engineering and geocryological zoning of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia) // Inzhenernaya geologiya, 2017. № 2. P. 28–37 (in Russian).
6. Спектор В.Б., Спектор В.В. Рельеф и геологическое строение территории Большого Якутска // Прикладные

экологические проблемы г. Якутска: сборник научных трудов. Новосибирск: Наука, 2017. С. 7–15.

Spektor V.B., Spektor V.V. Relief and geological structure of the territory of Greater Yakutsk // *Prikladnye ekologicheskie problemy g. Yakutsk: sbornik nauchnykh trudov*. Novosibirsk: Nauka, 2017. P. 7–15 (in Russian).

7. Рекомендации по контролю качества выполнения дорожно-строительных работ методом георадиолокации. Отраслевой дорожный методический документ 218.3.075-2016. Министерство транспорта РФ. Служба дорожного хозяйства РФ (РОСАВТОДОР). М., 2016. 71 с.

Recommendations for quality control of road construction works by the method of GPR. Industry road guidance document 218.3.075-2016. Ministerstvo transporta RF. Sluzhba dorozhnogo khozyaystva RF (ROSAVTODOR). M., 2016. 71 p. (in Russian).

8. Федорова Л.Л., Соколов К.О., Саввин Д.В., Стручков А.С. Данные мониторинговых георадиолокационных зондирований автодороги // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2016620713, 01.06.2016. Заявка № 2016620386 от 05.04.2016.

Fedorova L. L., Sokolov K. O., Savvin D. V., Struchkov A. S. Data of monitoring GPR sounding of highways // *Svidetel'stvo o registratsii bazy dannykh RU 2016620713, 01.06.2016. Zayavka № 2016620386 ot 05.04.2016* (in Russian).

9. Программа управления георадаром «ОКО-3» и визуализации получаемых данных. Иллюстрированное руководство пользователя. Версия 2.5. М.: ООО «ЛЮГИС», 2018. 138 с.

OKO-3 GPR control program and visualization of the received data. Illustrated user's guide. Version 2.5. M: ООО «LOGIS», 2018. 138 p. (in Russian).

10. Нерадовский Л.Г. Температурная зависимость сигналов георадиолокации в освоенных районах криолитозоны Якутии / отв. ред. Г.П. Кузьмин; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т мерзлотоведения им. П.И. Мельникова. Якутск: Изд. Ин-та мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2011. 166 с.

Neradovskiy L.G. The temperature dependence of georadiolocation signal in the developed regions of the permafrost zone of Yakutia / *otv. red. G.P. Kuz'min; Ros. akad. nauk, Sib. otd-nie, In-t merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova. Yakutsk: Izd. In-ta merzlotovedeniya im. P.I. Mel'nikova SO RAN, 2011. 166 p. (in Russian).*

11. Владов М.Л., Судакова М.С. Георадиолокация. От физических основ до перспективных направлений. Учебное пособие. М.: Изд. «ГЕОС», 2017. 240 с.

Vladov M.L., Sudakova M.S. Ground penetrating radar. From the physical basics to the most promising directions. Textbook. M: Izd. «GEOS», 2017. 240 p. (in Russian).

12. Нерадовский Л.Г. К вопросу о стохастической природе сигналов георадиолокации // *Геофизика*. 2013. № 2. С. 58–62.

Neradovskiy L.G. The question of stochastic nature of georadiolocation signal // *Geophysika*, 2013. № 2. P. 58–62 (in Russian).

13. Нерадовский Л.Г. Способ георадиолокации многолетнемерзлых пород // Патент 2490671 RU, МПК G01V 3/12, G01S1 3/88. заяв. Л.Г. Нерадовский. № 2011125238/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 20.08.2013. Бюл. № 23. 11 с.

Neradovsky L.G. Method of GPR of permafrost rocks // Patent 2490671 RU, MPK G01V 3/12, G01S1 3/88. заяв. L.G. Neradovskiy. № 2011125238/28; заявл. 17.06.2011; publ. 20.08.2013. Byul. № 23. 11 p. (in Russian).

14. Соколов К.О., Нерадовский Л.Г. Анализ георадиолокационных данных на основе аппроксимации амплитудных значений степенной функцией // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015661470 Российской Федерация. Заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук. № 2015618054; заявл. 02.09.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. 2015. № 11. 1 с.

Sokolov K.O., Neradovsky L.G. Analysis of GPR data based on approximation of amplitude values by a power function // *Svidetel'stvo o gos. registratsii programmy dlya EVM № 2015661470 Rossiyskaya Federatsiya. Zayavitel' i pravoo-bladatel' Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethnoe uchrezhdenie nauki Institut gornogo dela Severa im. N.V. Cherskogo Sibirskogo otdeleniya Rossiyskoy akademii nauk. № 2015618054; zayavl. 02.09.2015; publ. 20.11.2015, Byul. 2015. № 11. 1 p. (in Russian).*

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

Kulaichev A.P. Methods and tools for integrated data analysis. M.: FORUM. INFRA-M, 2006. 512 p. (in Russian).

16. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие. М.: Изд. МГУ, 2008. 192 с.

Starovoitov A.V. Interpretation of GPR data. Textbook. M: Izd. MGU, 2008. 192 p. (in Russian).

17. Судакова М.С., Владов М.Л. Современные направления георадиолокации // *Вестник Московского университета. Серия 4. Геология*. 2018. № 2. С. 3–12.

Sudakova M. S., Vladov M.L. Modern Directions of Application of Ground-Penetrating Radar // *Moscow University Geology Bulletin*. 2018. Vol. 73. № 3. P. 219–228. DOI: 10.3103/S0145875218030109.