

УДК 621.396.96:625.731.4 (571.56)

## ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Канд. техн. наук, доцент **Л.Л. Федорова**,

канд. техн. наук **Д.В. Саввин**,

инженер **М.П. Федоров**,

инженер **Г.А. Куляндин**,

инженер **А.С. Стручков**

(Институт горного дела

Севера им. Н.В. Черского СО РАН)

Конт. информация: [Lar-fed-90@rambler.ru](mailto:Lar-fed-90@rambler.ru);

[savvin.denis@inbox.ru](mailto:savvin.denis@inbox.ru);

[kgavriliu@yandex.ru](mailto:kgavriliu@yandex.ru);

[struchkovalexander@gmail.com](mailto:struchkovalexander@gmail.com);

+7(4112) 390074

*В статье представлены результаты исследований, которые показывают, что величина снижения скорости распространения электромагнитной волны в грунтах в талом состоянии, по сравнению с мерзлым, зависит от их влажности. Показано, что эта зависимость аппроксимируется линейной эмпирической формулой, на основе которой предложена методика мониторинга состояния грунтов по данным разносезонных измерений. С целью объективной интерпретации результатов исследований в условиях криолитозоны разработаны признаки для выявления зон повышенной влажности, таликов, участков ослабленных грунтов, пучения и границ миграции грунтовых вод. Возможность разработанной методики показана на примере георадиолокационного обследования автомобильных дорог Якутии.*

**Ключевые слова:** георадиолокация, мониторинг, грунты, мерзлые породы, влажность, диэлектрическая проницаемость.

Эксплуатация автомобильных дорог в области развития многолетнемерзлых пород требует непрерывного процесса наблюдений за состоянием грунтов, обусловленных сезонными изменениями их свойств, а также развитием в них негативных криогенных процессов [1-3]. Опыт геофизических исследований последних лет показал, что для мониторинга сезонных изменений свойств грунтов наиболее эффективным представляется метод георадиолокации. Метод георадиолокации осно-

ван на отражении электромагнитной волны от границ раздела сред, которые имеют различные электрофизические свойства. Основными свойствами горных пород и грунтов являются электрическое сопротивление ( $\rho$ ) и диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ). К преимуществам георадиолокации можно отнести оперативность проведения работ и информативность выдачи конечного результата. Однако, учитывая сложное криогенное строение, многообразие структур мерзлых грунтов и большой объем информации, получаемой при георадиолокационных измерениях автомобильных дорог, обработка и интерпретация данных георадиолокации – это трудоемкий и сложный процесс, требующий привлечения информации по опорному бурению, других геофизических методов [4-10]. Для объективной интерпретации георадиолокационных результатов исследований грунтов автомобильных дорог в области криолитозоны необходимо изучение характерных особенностей волновых полей, отражающих криогенные процессы и явления.

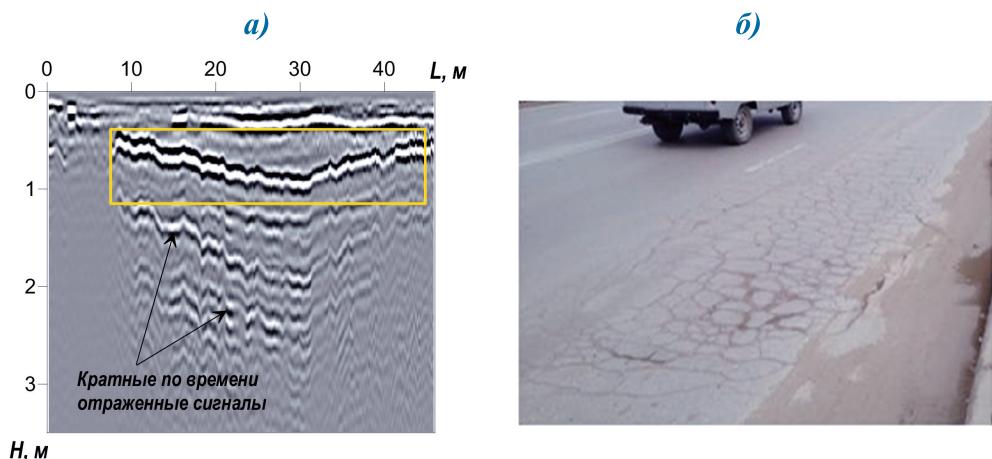
Ниже представлены признаки интерпретации геокриологических процессов, разработанные авторами данной статьи путем сопоставления результатов георадиолокации с данными бурения и анализа волновой картины полученных радарограмм, с учетом конфигурации, интенсивности и протяженности осей синфазности отраженных сигналов.

### ***Картирование зон повышенной влажности***

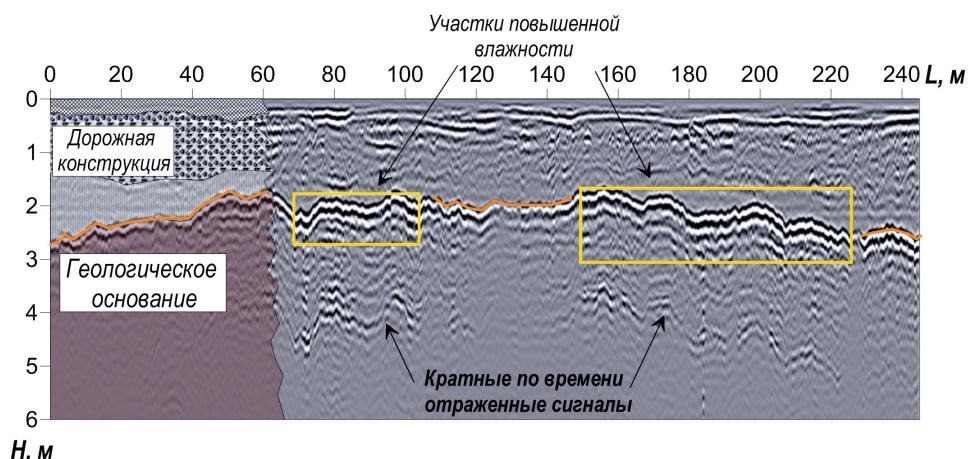
При наличии объектов с большими контрастами диэлектрических свойств, например, на границе слоя сильновлажных грунтов  $\epsilon_1 = 15$  и мерзлых пород  $\epsilon_2 = 4$ , возникают кратные волны. Например, на радарограмме, полученной антенным блоком АБ-400 георадара «ОКО-2» в ходе осенних измерений, эти волны затрудняют обработку и интерпретируются как помехи (рис. 1 а). При повышенной влажности на этой границе коэффициент отражения составит 0,3 и, соответственно, 30% энергии отразится вверх, далее прослеживаются переотражения электромагнитной волны в мерзлом слое. Для задачи картирования зон повышенной влажности эти волны могут выступать в качестве полезного сигнала-индикатора, по которым можно определить их местоположение как по глубине, так и по расстоянию. На таких участках повышенной влажности грунтов происходит деформация дорожного покрытия (рис. 1 б).

На рис. 2 представлен фрагмент радарограммы автомобильной дороги «Вилюйский тракт» (г. Якутск). Радарограмма была получена в ходе измерений при помощи антенного блока АБ-400 георадара «ОКО-2» в осенний период. Граница на уровне 2-3 м интерпретируется

как отражение от геологического основания с выложенным на нем геосинтетическим материалом типа пеноплекс. Выделенные аномалии представляют собой зоны переотражений, сформированные кратными электромагнитными волнами, образовавшимися на контрастных электрофизических границах – влажный песок и мерзлые породы. Такой анализ позволил выделить два участка повышенной влажности на отметке 68-103 м и 151-225 м.



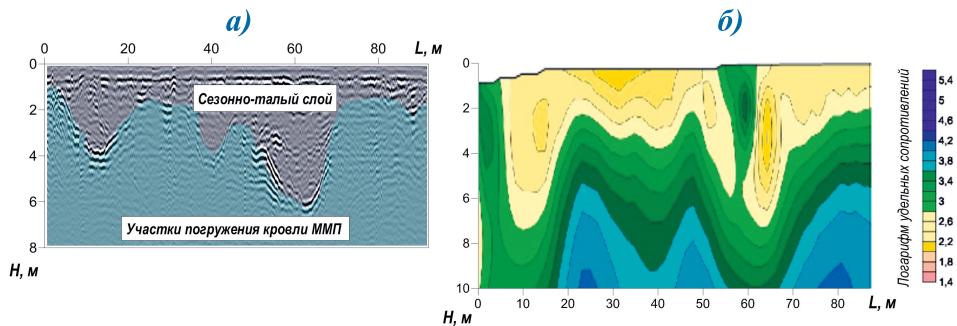
*Рис. 1. На фрагменте радарограммы выделена граница повышенной влажности (а), которая привела к деформации дорожного покрытия (б)*



*Рис. 2. Пример выявления участков повышенной влажности грунтов автомобильной дороги «Вилюйский тракт» (г. Якутск)*

## **Определение слоя сезонного оттаивания и промерзания грунтов**

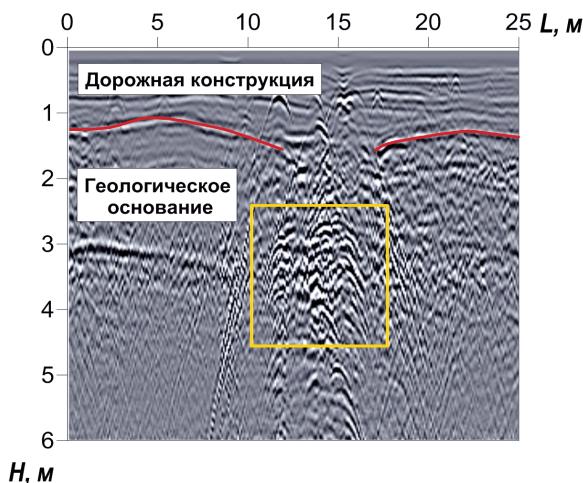
В условиях криолитозоны, при строительстве и эксплуатации инженерных объектов, в том числе автомобильных дорог, наиболее актуально стоит вопрос определения слоя сезонного оттаивания и промерзания грунтов. Глубина сезонно-тального слоя (СТС) для Якутска составляет в среднем 1,5-1,7 м для суглинков, для супесей – 1,6-2,0 м и для песков – 2,0-2,5 м [11]. На радарограммах слой сезонного оттаивания выделяется ненарушенными, протяженными, контрастными осьми синфазности, по положению которых возможно выделение этих границ. Взаимодействие инженерных объектов с геологической средой вносит большие изменения в температурный режим многолетнемерзлых пород. Все это сопровождается локальным увеличением глубины деятельного слоя, заболачиванием, образованием таликов и термокарстовых процессов. Таким образом, участки образующихся таликов и зарождающихся термокарстовых процессов в большинстве случаев определяются, как показано на **рис. 3 а**, аномальным понижением кровли многолетнемерзлых пород (ММП). Радарограмма была получена антенным блоком АБ-250 георадара «ОКО-2» в ходе осенних измерений. Результаты георадиолокации подтверждены низкоомными областями по данным электроразведки (**рис. 3 б**), практически такой же конфигурации. Исследуемый участок работ характеризуется заболачиванием.



**Рис. 3. Результаты обследования проектируемой технологической автомобильной дороги, на участке которой выявлено понижение кровли многолетнемерзлых пород**

## *Определение зоны ослабления грунтов*

Зоны ослабления грунтов образуются в результате выноса водным потоком части грунтов определенной фракции, что приводит к образованию нарушений горизонтально-слоистого строения. Наличие нарушенных структур, вызванных разуплотнением грунтов дорожной конструкции, на радарограммах отображается дифракцией электромагнитных волн и образованием вторичных источников волн, как показано на **рис. 4 а.** Следствием ослабления грунтов на участке стала просадка покрытия (**рис. 4 б.**), которая образовалась через год после георадиолокационного обследования.



*Рис. 4 а. Фрагмент радарограммы – зона ослабленных грунтов автомобильной дороги выделена желтым*



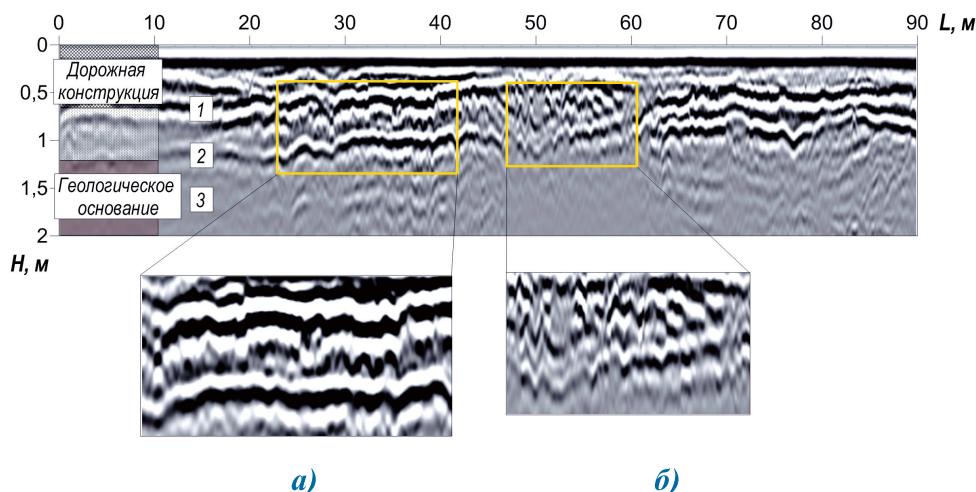
*Рис. 4 б. Участок автомобильной дороги с просадкой покрытия*

На **рис. 5** показан фрагмент радарограммы участка обследования автомобильной дороги по ул. Лермонтова (г. Якутск). Радарограмма была получена антенным блоком АБ-1200 георадара «ОКО-2» в ходе осенних измерений. По данным проекта мощность дорожной конструк-

ции составляет 1,2 м. На радарограмме выделена граница подошвы дорожной одежды – 1, а также подошва насыпных грунтов – 2. Ниже располагается геологическое основание – 3 (рис. 5), а также выделены две локальные зоны. На отметке с 22 м по 41 м – первая зона, показывающая горизонтально-слоистое ненарушенное строение дорожного полотна (рис. 5 а). С отметки 47 м по 60 м показана вторая зона, характеризующаяся аномалией в виде «хаотичных» отражений (рис. 5 б). Такая аномалия образовалась в результате проникновения поверхностных вод в тело насыпи с дальнейшим размыванием грунтов, что проявляется на поверхности деформацией дорожной одежды.

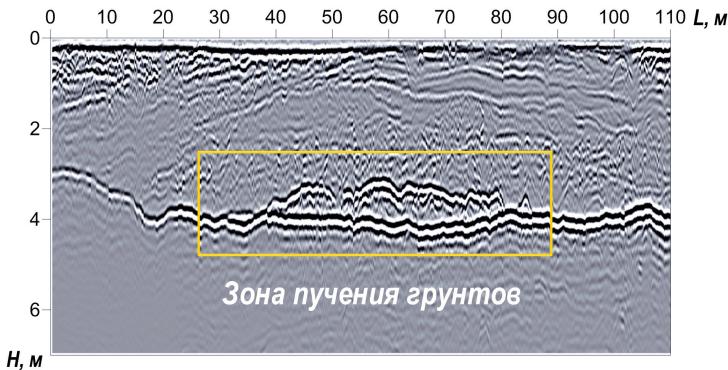
### *Выявление участков пучения грунтов*

При строительстве и эксплуатации инженерных сооружений в районах развития многолетнемерзлых пород большое значение имеет выявление участков пучения грунтов. Зоны такого вида аномалий на радарограмме представляются в виде линзообразных объектов (рис. 6). Радарограмма получена антенным блоком АБ-400 георадара «ОКО-2» в ходе осенних измерений. Наиболее уверенно на радарограммах аномалии фиксируются в процессе протаивания грунтов, когда появляются дополнительные отражающие границы и локальные зоны, связанные с изменением мерзлотно-грунтовых условий участка.



*Рис. 5. Зона ослабленных грунтов на автомобильной дороге  
(ул. Лермонтова, г. Якутск):*

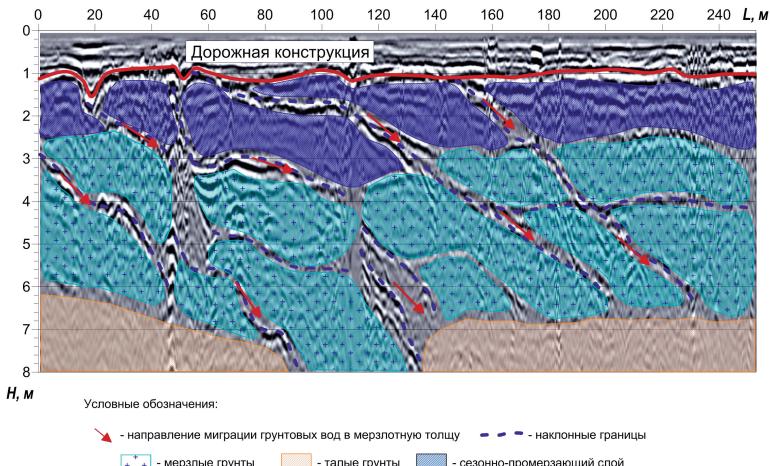
- а) горизонтально-слоистое строение автодороги;*
- б) нарушение горизонтально-слоистого строения*



*Рис. 6. Отображение грунтов пучения на радарограмме*

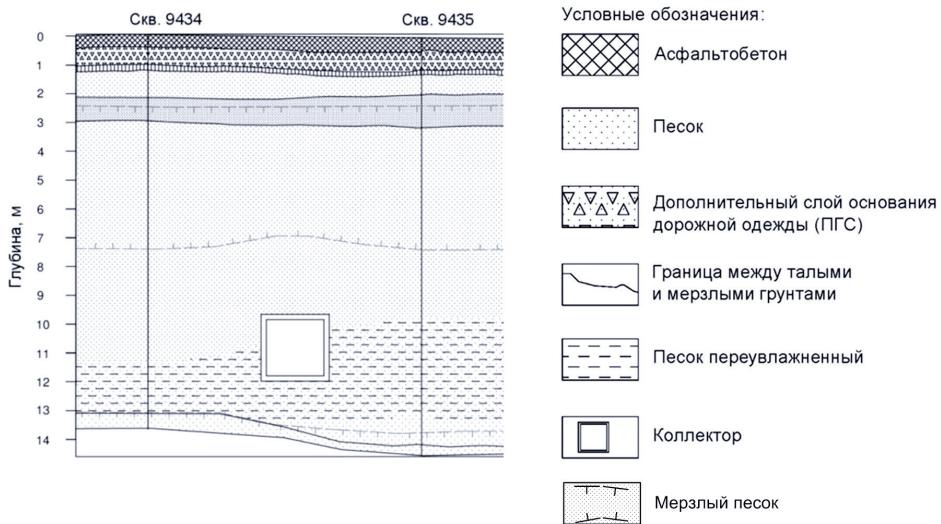
### *Определение границ миграции грунтовых вод*

Миграция вод в грунтах автомобильных дорог происходит по кровле мерзлых пород, представляющих собой водоупор. В данном случае кратного переотражения сигналов не происходит из-за значительного поглощения электромагнитной энергии в талых грунтах. На радарограмме, полученной антенным блоком АБ-250 георадара «ОКО-2» (рис. 7), выделены отличающиеся своей контрастностью наклонные границы, по которым происходит сброс сезонных грунтовых вод в мерзлотную толщу.



*Рис. 7. Фрагмент радарограммы, отражающей миграцию грунтовых вод*

Обследование автомобильной дороги по ул. Дзержинского (г. Якутск) проводились в весенний период. Визуальные наблюдения поверхности асфальтового покрытия позволили установить связь между повреждениями автомобильной дороги (трещины, видимые просадки и т.д.) и выделенными наклонными границами, интерпретируемыми как пути миграции грунтовых вод. Слои, выделенные на радарограмме, соответствуют мерзлотно-грунтовому разрезу автомобильной дороги, построенному по данным бурения на ул. Дзержинского в 1994 г. ООО «Геотехнология» (Ф.Е. Попенко) [12] (рис. 8).



*Рис. 8. Поперечный разрез участка ул. Дзержинского по данным бурения 1994 г.*

### *Георадиолокационный мониторинг влажности грунтов автодорог*

Для определения возможности количественной оценки значений влажности грунтов автомобильных дорог методом георадиолокации авторами данной статьи проведены лабораторные исследования влияния влажности на характеристики георадиолокационных сигналов на образцах речного и горного песка [13]. Исследование образцов проводилось контактным зондированием георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 1200 МГц. Отбор проб и определение влажности ( $W, \%$ ) осуществлялись согласно ГОСТ 5180-84 [14].

В процессе эксперимента проводилось увлажнение, замораживание с последующим оттаиванием образцов. Подготовленные образцы помещали в холодильную камеру «Castlcool» до полного замораживания при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . После замораживания их выдерживали при температуре  $+22^{\circ}\text{C}$  до полного оттаивания. В процессе оттаивания и до полного оттаивания проводилось георадиолокационное зондирование образцов через каждые 30 мин. По данным лабораторных работ рассчитаны скорости распространения электромагнитных волн  $V$  при оттаивании образцов различной влажности. Установлено, что величина снижения скорости распространения электромагнитной волны в породах  $N_V = \frac{(V_m - V_t)}{V_m} * 100\%$  в талом состоянии  $V_t$  по сравнению с мерзлым  $V_m$  зависит от влажности  $W$  образца. При этом такая зависимость аппроксимируется линейной эмпирической формулой:

$$N_V = 1,55W + c , \quad (1)$$

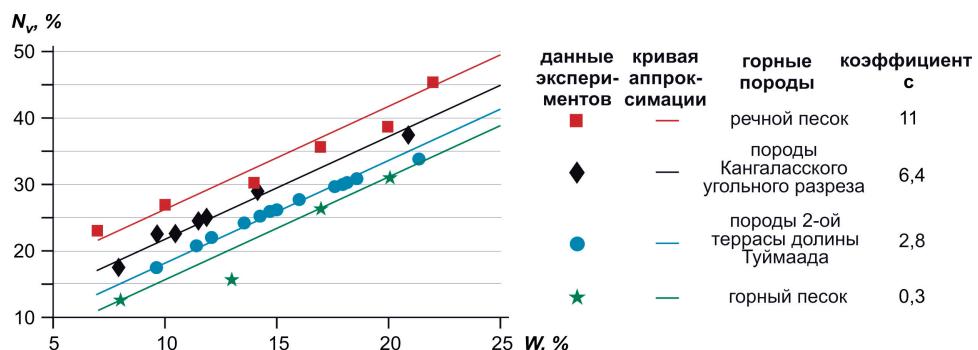
где

$c$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава горных пород и грунтов.

Предложенное выражение позволяет получать достоверные результаты расчетов при влажности пород выше 7%. Так, по лабораторным данным, для горного песка коэффициент  $c$  был определен величиной – 0,3, а для речного – 11 (рис. 9).

Экспериментальные исследования по апробации данной зависимости в натурных условиях выполнены на двух объектах. Первый объект – на участке у автомобильной дороги А331 «Вилюй» в черте г. Якутска (вторая терраса долины Туймаада), второй объект – массив вскрытых пород Кангаласского угольного разреза (Республика Саха (Якутия)). На этих объектах проведены разносезонные георадиолокационные измерения в режиме профилирования. На полученных радарограммах отслеживалось изменение времени задержки осей синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от опорной границы, в зависимости от влажности горных пород. За опорную границу принята кровля многолетнемерзлых пород на глубине  $\approx 2$  м. Влажность пород определялась термостатно-весовым методом. Для этого после каждого георадиолокационного измерения проводилось ручное бурение скважин с отбором образцов. По данным бурения скважин и времени задержки георадиолокационных сигналов рассчитаны относительные изменения скорости распространения электромагнитной волны ( $N_V$ ) от влажности

пород. На **рис. 10** показаны экспериментальные значения  $N_V$  в диапазоне влажности 7-25 % и соответствующие определенным образцам кривые аппроксимации с коэффициентами  $c$ . Поскольку породы Кангаласского угольного разреза и 2-ой террасы долины Туймаада представлены различными песками и суглинками, то значения  $N_V$  для них расположились между лабораторными данными для речного и горного песков.



**Рис. 9. Зависимости относительного изменения скорости распространения электромагнитной волны ( $N_V$ ) от вещественного состава и влажности ( $W$ ) горных пород**

Описанные выше результаты лабораторных и экспериментальных работ позволили разработать методику оценки влажности пород на основе определения относительного изменения времени задержки  $N_t = \frac{t_T - t_M}{t_T} \cdot 100\%$  георадиолокационных сигналов, отраженных от границ раздела сред в мерзлом ( $t_M$ , нс) и талом ( $t_T$ , нс) состоянии горных пород, для последующего расчета значений их влажности ( $W$ , %) по эмпирической формуле:

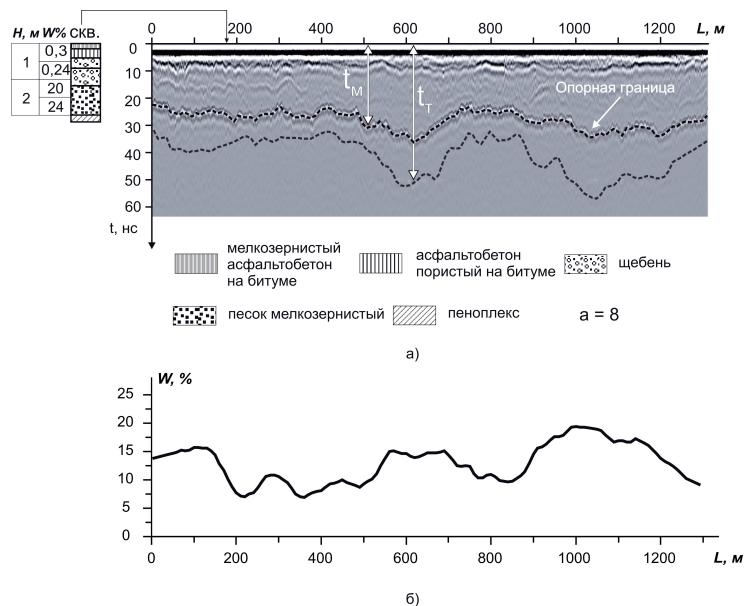
$$W = 0,65 \cdot N_t - a , \quad (2)$$

где

$a$  – коэффициент, зависящий от вещественного состава исследуемых горных пород.

На **рис. 10** приведен пример практического применения разработанной методики для оценки влажности грунтов автомобильной дороги. Апробация методики проводилась на участке автомобильной дороги Вилюйский тракт (г. Якутск), построенной по технологии с укладкой

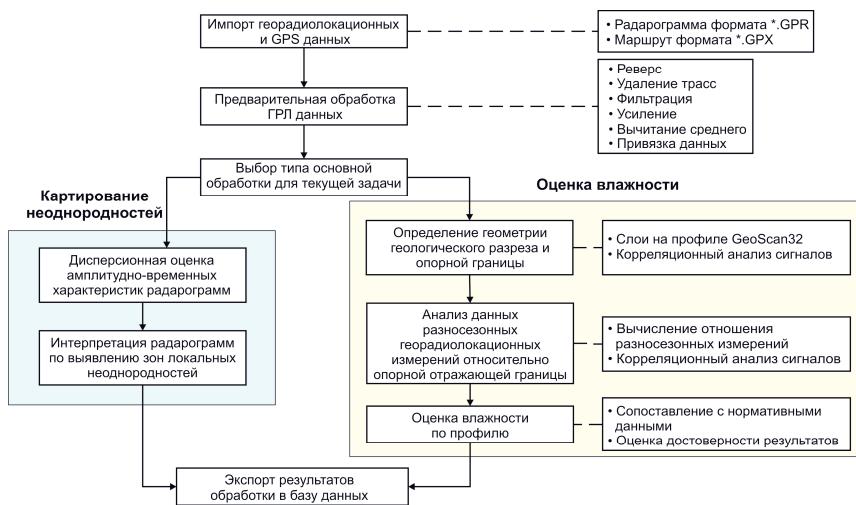
пеноплекса, являющейся отличной опорной отражающей границей для данных экспериментов.



**Рис. 10. Пример оценки влажности грунтов автомобильной дороги**  
 а) радарограмма, на которой представлены результаты выделения опорной границы в мерзлом ( $t_M$ ) и талом ( $t_T$ ) состоянии грунтов;  
 б) результаты расчета средней весовой влажности  $W$  исследуемых грунтов

### Программно-методическое обеспечение георадиолокационного мониторинга криогенных процессов

На основе выделенных особенностей волновых полей и методики оценки влажности грунтов разработан специализированный программно-методический комплекс георадиолокационного (ГРЛ) мониторинга криогенных процессов в грунтах дорожной конструкции (рис. 11). Программное обеспечение состоит из двух блоков. Первый блок позволяет выделять локальные неоднородности на основе дисперсионной оценки амплитудно-временных характеристик сигналов [15, 16]. При формировании георадиолокационной трассы в аномальной среде (участки повышенной влажности, разуплотнение грунтов) изменяется амплитуда сигналов (A), время задержки ( $t$ ) и частотный состав регистрируемых сигналов.



**Рис. 11. Программное обеспечение ГРЛ мониторинга криогенных процессов**

Появление подобных сигналов приводит к увеличению такой статистической характеристики, как дисперсия ( $DX$ ), которая определяет отклонение энергии сигналов от среднего ожидаемого значения:

$$DX = \frac{\sum_{i=k_1}^{k_n} (X_i - \bar{X})^2}{n}, \quad (3)$$

где

$X_i$  – амплитуда сигнала;

$\bar{X}$  – среднее значение амплитуды сигнала;

$k_1 \dots k_n$  – временной интервал анализируемой совокупности данных;

$n$  – количество значений амплитуд в анализируемой совокупности данных.

Второй блок обеспечивает реализацию методики оценки влажности грунтов на основе разносезонных георадиолокационных измерений. Методика оценки средней весовой влажности грунтов включает следующие этапы:

- проведение георадиолокационных измерений грунтов в мерзлом и талом состоянии;

- контрольное бурение с взятием проб влажности для определения коэффициента  $a$ ;
- расчет относительного изменения времени задержки георадиолокационных сигналов;
- расчет средней весовой влажности грунтов с учетом их вещественного состава по коэффициенту  $a$ ;
- визуализацию результатов расчета влажности исследуемых грунтов.

Также разработан программный блок, позволяющий хранить результаты георадиолокационных измерений в структурированном виде в базе данных (PostgreSQL) с возможностью их визуализации в геоинформационной системе QuantumGIS (рис. 12). Для обеспечения возможности переноса и отображения данных разработаны динамически подключаемые библиотеки, реализующие автоматизированную обработку георадиолокационных данных и приведение к формату, используемому в QuantumGIS.



*Рис. 12. Представление результатов оценки влажности грунтов автомобильной дороги по ул. Дзержинского (г. Якутск)*

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные работы показали возможность эффективного применения метода георадиолокации для обследования грунтов дорожной конструкции автомобильных дорог георадарами серии «ОКО-2» (группа компаний «ЛОГИС-ГЕОТЕХ»). При этом выработаны георадиолокационные признаки зон повышенной влажности, таликов, участков ослабленных грунтов, пучения, а также границ инфильтрации поверхностных и грунтовых вод. Предложена оригинальная методика мониторинга влажности грунтов, преимуществом которой является определение свойств грунта в каждой точке исследуемого участка с использованием разносезонных измерений. Разработанная методика позволяет автоматизировать процесс сбора, хранения и обработки информации и включает георадиолокационную, координатную привязку для качественного анализа состояния грунтов дорожной конструкции автомобильных дорог, эксплуатируемых в условиях криолитозоны. Результаты геофизической диагностики в комплексе с инженерно-геологическими работами позволяют обоснованно вырабатывать мероприятия по предупреждению и ликвидации опасных геокриологических процессов.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. – Пущино: ОНТИ ПНЦ РАН, 2005. – 607 с.
2. Шестернев Д.М. Линейные сооружения в криолитозоне России / Д.М. Шестернев // Материалы пятой конференции геокриологов России. – Сумы: Изд-во ООО Издательско-торговый дом «Университетская книга», 2016. – С. 228-235.
3. Кулижников А.М. Оценка состояния грунтов георадиолокационными методами / А.М. Кулижников // Дороги и мосты. – 2016. – № 36/2. – С. 113-129.
4. Владов М.Л. Применение георадиолокации при изысканиях для линейного строительства и обследовании автомобильных дорог: учебное пособие / М.Л. Владов. – Тверь: ГЕРС, 2011. – 192 с.
5. Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных: учебное пособие / А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2008. – 192 с.
6. Tran A.P. Soil moisture estimation using full-wave inversion of near-and far-field ground penetrating radar data: A comparative evaluation / A.P. Tran, F. Wiaux, S. Lambot // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4–8, 2012. – Shanghai, China, 2012. – V.1. – PP. 300-304.

7. Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo, T. Scullion // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – V. 43. – PP. 119-138.
8. Омельяненко А.В. Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород / А.В. Омельяненко, Л.Л. Федорова. – Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2006. – 136 с.
9. Harry M.J. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / M.J. Harry. – Elsevier, 2009. – 524 с.
10. Huisman J.A. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review / J.A. Huisman, S.S. Hubbard, J.D. Redman, A.P. Annan // Vadose Zone Journal. – 2003. – V. 2(4). –PP. 476-491. – Электрон. данные. – URL: [http://phineas.unistra.sbg.fr/sailhac/liens/Cours/HGP/Articles2008/Huisman\\_VZJ\\_03\\_476.pdf](http://phineas.unistra.sbg.fr/sailhac/liens/Cours/HGP/Articles2008/Huisman_VZJ_03_476.pdf) (дата обращения 26.11.2017).
11. Алексеева О.И. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) / О.И. Алексеева, В.Т. Балобаев, М.Н. Григорьев, В.Н. Макаров, Р.В. Чжсан, М.М. Шац, В.В. Шепелев // Криосфера Земли, 2007. – Т. XI. – № 2. – С. 76-83.
12. Шац М.М. Проблемы развития транспортных систем города Якутска (Состояние и пути решения) / М.М. Шац, Ю.Б. Скачков // Экология урбанизированных территорий. – 2015. – №4. – С. 42-50.
13. Fedorova L. L. Studying of Influence of Temperature of Rocks with Varying Humidity on GPR Data / L.L. Fedorova, K.O. Sokolov, D.V. Savvin, A.P. Ammosov // GPR 2016: 16<sup>th</sup> International Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong Polytechnic University on 13-16 June 2016. – Hong Kong, 2016. – Электрон. данные. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7572637/> (дата обращения 18.01.2017).
14. ГОСТ 5180 – 84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Взамен ГОСТ 5180-75. – Введ. 30.06.1985. – М: Стандартинформ, 2005. – 19 с.
15. Федорова Л.Л. Возможности диагностики криогенных процессов в грунтах оснований автодорог методом георадиолокации / Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин, М.П. Федоров // Горн. информ.-аналит. бюл.– 2017. – № 7. – С. 195-202.
16. Соколов К.О. Обоснование структуры и функциональности алгоритмического обеспечения георадиолокационного мониторинга влажности горных пород криолитозоны / К.О. Соколов, Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин, А.С. Стручков // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 9-1. – С. 93-98.

## LITERATURA

1. *Frolov A.D. Jelektricheskie i uprugie svojstva merzlyh porod i l'dov / A.D. Frolov. – Pushhino: ONTI PNC RAN, 2005. – 607 s.*
2. *Shesternev D.M. Linejnye sooruzhenija v kriolitozone Rossii / D.M. Shesternev // Materialy pjatoj konferencii geokriologov Rossii. – Sumy: Izd-vo OOO Izdatel'sko-torgovyj dom «Universitetskaja kniga», 2016. – S. 228-235.*
3. *Kulizhnikov A.M. Ocenna sostojaniya gruntov georadiolokacionnymi metodami / A.M. Kulizhnikov // Dorogi i mosty. – 2016. – # 36/2. – S. 113-129.*
4. *Vladov M.L. Primenenie georadiolokacii pri izyskanijah dlja linejnogo stroitel'stva i obsledovanii avtomobil'nyh dorog: uchebnoe posobie / M.L. Vladov. – Tver': GERS, 2011. – 192 s.*
5. *Starovojtov A.V. Interpretacija georadiolokacionnyh dannyh: uchebnoe posobie / A.V. Starovojtov. – M.: Izd-vo MGU, 2008. – 192 s.*
6. *Tran A.P. Soil moisture estimation using full-wave inversion of near-and far-field ground penetrating radar data: A comparative evaluation / A.P. Tran, F. Wiaux, S. Lambot // Proceedings of the 14th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 4–8, 2012. – Shanghai, China, 2012. – V.1. – PP. 300-304.*
7. *Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar / T. Saarenketo , T. Scullion // Journal of Applied Geophysics. – 2000. – V. 43. – PP. 119-138.*
8. *Omel'janenko A.V. Georadiolokacionnye issledovaniya mnogoletnemerzlyh porod / A.V. Omel'janenko, L.L. Fedorova. – Jakutsk: Izd-vo JaNC SO RAN, 2006. – 136 s.*
9. *Harry M.J. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications / M.J. Harry. – Elsevier, 2009. – 524 c.*
10. *Huisman J.A. Measuring Soil Water Content with Ground Penetrating Radar: A Review / J.A. Huisman, S.S. Hubbard, J.D. Redman, A.P. Annan // Vadose Zone Journal. – 2003. – V. 2(4). –PP. 476-491. – Jelektron. dannye.  
– URL: [http://phineas.u-strasbg.fr/sailhac/liens/Cours/HGP/Articles2008/Huisman\\_VZJ\\_03\\_476.pdf](http://phineas.u-strasbg.fr/sailhac/liens/Cours/HGP/Articles2008/Huisman_VZJ_03_476.pdf) (data obrashhenija 26.11.2017).*
11. *Alekseeva O.I. O problemah gradostroitel'stva v kriolitozone (na primere Jakutска) / O.I. Alekseeva, V.T. Balobaev, M.N. Grigor'ev, V.N. Makarov, R.V. Chzhan, M.M. Shac, V.V. Shepelev // Kriosfera Zemli, 2007. – T. XI. – # 2. – S. 76-83.*
12. *Shac M.M. Problemy razvitiya transportnyh sistem goroda Jakutska (Sostojanie i puti reshenija) / M.M. Shac, Ju.B. Skachkov // Jekologija urbanizirovannyh territorij. – 2015. – #4. – S. 42-50.*
13. *Fedorova L. L. Studying of Influence of Temperature of Rocks with Varying Humidity on GPR Data / L.L. Fedorova, K.O. Sokolov, D.V. Savvin,*

- A.P. Ammosov // GPR 2016: 16th International Conference of Ground Penetrating Radar in The Hong Kong Polytechnic University on 13-16 June 2016. – Hong Kong, 2016. – Jelektron. dannye. – URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7572637/> (data obrashhenija 18.01.2017).*
14. *GOST 5180 – 84. Grunty. Metody laboratornogo opredelenija fizicheskikh harakteristik. – Vzamen GOST 5180-75. – Vved. 30.06.1985. – M: Standartinform, 2005. – 19 s.*
  15. *Fedorova L.L. Vozmozhnosti diagnostiki kriogennyh processov v gruntah osnovaniy avtodorog metodom georadiolokacii / L.L. Fedorova, D.V. Savvin, M.P. Fedorov // Gorn. inform.-analit. bjul.– 2017. – # 7. – S. 195-202.*
  16. *Sokolov K.O. Obosnovanie struktury i funkcional'nosti algoritmicheskogo obespechenija georadiolokacionnogo monitoringa vlazhnosti gornyh porod kriolitozony / K.O. Sokolov, L.L. Fedorova, D.V. Savvin, A.S. Struchkov // Fundamental'nye issledovaniya. – 2017. – # 9-1. – S. 93-98.*
- 

***GPR MONITORING OF SOILS CONDITION  
OF ROAD CONSTRUCTIONS OPERATED  
IN THE CONDITIONS OF CRYOLITHOZONE***

*Ph. D. (Tech.), Associated Professor **L.L. Fedorova**,*

*Ph. D. (Tech.) **D.V. Savvin**,*

*Engineer **M.P. Fedorov**,*

*Engineer **G.A. Kulyandin**,*

*Engineer **A.S Struchkov***

*(Mining Institute of the North*

*named after N.V. Chersky SB RAS)*

*Contact information: Lar-fed-90@rambler.ru;*

*savvin.denis@inbox.ru;*

*kgavrilu@yandex.ru;*

*struchkovalexander@gmail.com;*

*+7(4112) 390074*

*The article deals with the results of researches which show that the size of reduction in the rate of distribution of an electromagnetic wave in soil in a thawed state, in comparison with frozen, depends on their humidity. It is revealed that this dependence is approximated by a linear empirical formula on the basis of which the monitoring method of soil condition by data of different-seasonal measurements is proposed. With the view of researches results objective interpretation in the conditions of the cryolithozone, the signs are developed for identification of zones of the increased humidity, taliks,*

*sites of the weakened soil, heaving and the infiltration boundaries of underground waters. The possibility of the developed method is shown on the example of georadar survey of roads of Yakutia.*

**Key words:** GPR (ground penetrating radar), monitoring, soils, frozen rocks, humidity, dielectric permeability.

---

Рецензент: д-р. техн. наук А.М. Кулижников (ФАУ «РОСДОРНИИ»)

Статья поступила в редакцию: 13.10.2017 г.