

Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин, М.П. Федоров

# ВОЗМОЖНОСТИ ДИАГНОСТИКИ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ГРУНТАХ ОСНОВАНИЙ АВТОДОРОГ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Изложены возможности диагностики криогенных процессов в грунтах оснований автодорог методом георадиолокации. Приведены основные волновые характеристики данных георадиолокации, получаемые при зондировании на участках деформаций дорожного полотна. При этом выработаны интерпретационные признаки негативных криогенных процессов в грунтах оснований автодорог. На основе выделенных признаков предложена методика диагностики и выявления негативных криогенных процессов. Отличительной особенностью предложенной методики является автоматизированное и оперативное выделение границ конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна, а также локальных неоднородностей связанных с негативными криогенными процессами. Представлены результаты применения разработанного комплекса программного обеспечения для георадиолокационной диагностики, позволяющего автоматизировать процесс сбора, хранения и обработки георадиолокационной информации. Возможность разработанного комплекса показана на примере георадиолокационного обследования автодорог Якутии. Представленная методика может быть использована в дорожной отрасли для диагностики негативных криогенных процессов участков автомобильных дорог при разработке проектов их ремонта и реконструкции.

Ключевые слова: георадиолокация, автомобильные дороги, программное обеспечение, диагностика, мерзлые грунты, криогенные процессы.

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-195-202

## Введение

Строительство и эксплуатация инженерных сооружений в Якутии неизбежно приводит к деградации вечной мерзлоты, связанной с климатическими, инженерно-геологическими условиями, а также нарушениями правил ведения хозяйственной деятельности на урбанизированных территориях. Следствием техногенного влияния на вечномерзлые грунты являются просадки при увеличении глубины сезонного оттаивания, образование таликовых зон, которые приводят к пучению, заболачиванию и подтоплению

[1]. Эти негативные криогенные процессы наиболее активно проявляются при эксплуатации автомобильных дорог. В настоящее время метод георадиолокации успешно применяется для обследования и диагностики автомобильных дорог, как в России, так и за рубежом благодаря высокой производительности работ и детальности исследований, а также возможности производства измерений в условиях урбанизированных территорий [2–7]. В статье приведены результаты георадиолокационного обследования автодорог Якутии с твердым покрытием, с высокой

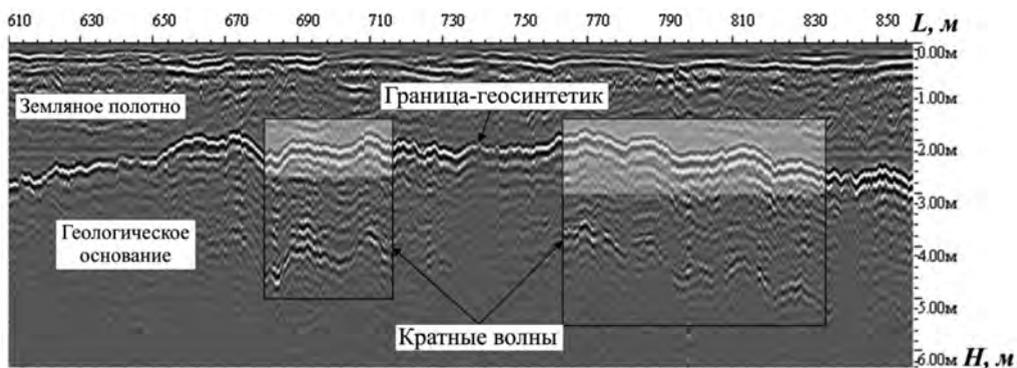


Рис. 1. Признаки повышенной влажности на георадиолокационном разрезе участка автодороги «Вилуйский тракт»

интенсивностью транспортного потока, в условиях городской застройки, а также грунтовых автодорог.

### Интерпретационные признаки негативных криогенных процессов в грунтах оснований автодорог

Результаты многолетних георадиолокационных исследований автомобильных дорог показали, что при наличии границ с большими контрастами диэлектрических свойств, к примеру, мерзлые — талые грунты возникают кратные волны. Эти кратные волны могут выступать в качестве полезного сигнала и способствовать выделению зон обводнения на границах конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна, как по расстоянию, так и по глубине автодороги [8].

На рис. 1 представлен фрагмент разреза автомобильной дороги «Вилуйский тракт». Отраженная граница на уровне 2–3 м интерпретируется как отражение от геологического основания с выложенным на нем геосинтетическим материалом — пеноплекс. На разрезе прослеживаются зоны переотражений, сформированные кратными электромагнитными волнами, образовавшимися на контрастных электрофизических границах влажный песок — мерзлые грунты.

Признак переотражений позволил выделить на разрезе два участка повышенной влажности на отметках 680–716 м и 762–836 м.

При переувлажнении грунтов и скопления большого количества воды, как на границе, так и в слоях конструкции автодороги, происходит затухание георадиолокационных сигналов как показано на рис. 2. Это затухание на отметках 32–104 м по профилю отмечается низкочастотными импульсами на границе раздела сред (глубина 0,5 м) и отсутствием осей синфазности отраженных волн ниже. Этот вид волновой картины образуется на потенциально опасных участках переувлажнения и может успешно использоваться в качестве распознавания структур, образующих аномалии такого вида. Данные георадиолокации, представленные на рис. 2, а, получены на участке разрушения асфальтового покрытия, показанном на рис. 2, б.

При наличии нарушенных структур вызванных разуплотнением грунтов земляного полотна происходит дифракция электромагнитных волн от неоднородной среды и образование вторичных источников волн на радарограммах. Эти отражения также могут выступать в качестве полезных сигналов при распознавании зон разуплотнения грунтов основания земляного полотна [9]. На рис. 3 показан

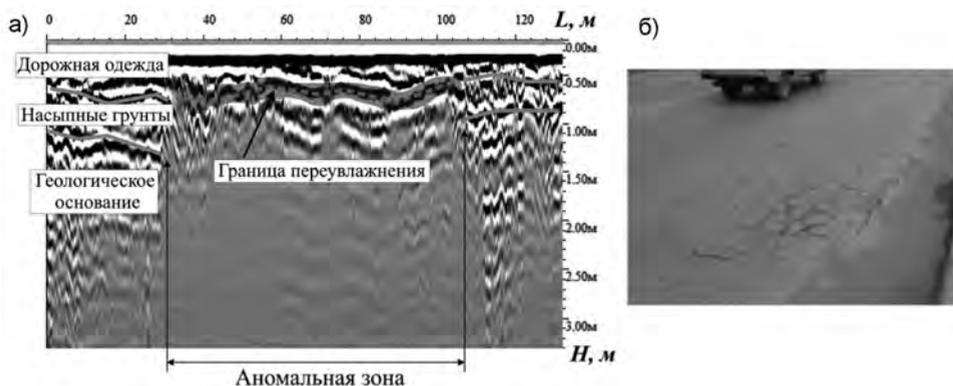


Рис. 2. Выявление участка переувлажнения на георадиолокационном разрезе

георадиолокационный разрез участка автомобильной дороги по улице Лермонтова (г. Якутск). По проекту мощность конструкции дорожной одежды составляет 0,67 м, ниже грунт земляного полотна — песок. На представленном разрезе выделена граница подошвы дорожной одежды (1), а также подошва насыпных песков (2). Ниже располагается естественный грунт — супесь (3). В отметках 44–60 м пунктирной линией отмечается аномальный слой (4) хаотичных импульсов-отражений. Анализ волновой картины с привлечением геологической и гидрогеологической информации позволил выявить слой разуплотненных грунтов.

Аномальная зона образовалась посредством проникновения поверхностных вод (атмосферные осадки) в тело насыпи с дальнейшим размыванием грунтов основания проявляющаяся на поверхности деформацией дорожной одежды.

Пример размывания грунтов естественного основания представлен на рис. 4 (фото сделано в 2011 г., в 2012 г. и в 2015 г.). На этом участке фрагмент георадиолокационного разреза в 2011 г. представлен на рис. 5. Разрушение дороги связано с разуплотнением грунтов вследствие протечки канализационных труб. В этой зоне волновая картина характеризуется наличием множества, хао-

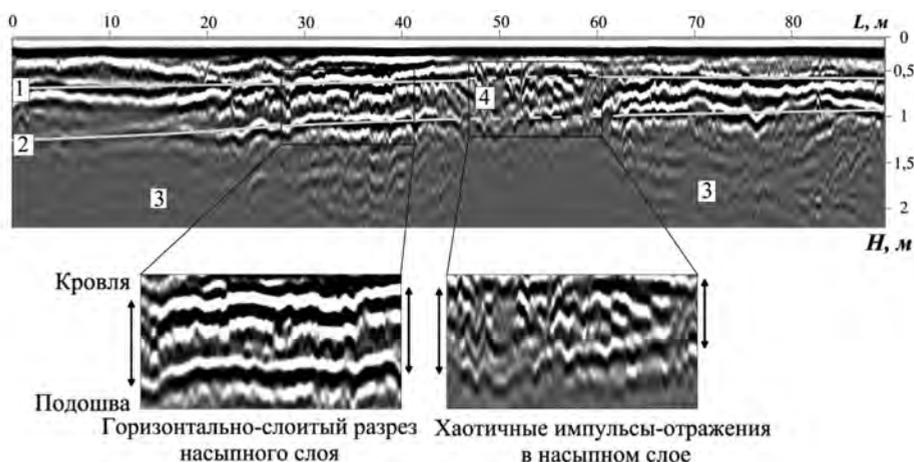


Рис. 3. Пример выявления разуплотнения грунтов на георадиолокационном разрезе участка автодороги ул. Лермонтова (г. Якутск)



Рис. 4. Участок разрушения дорожного полотна ул. Короленко (г. Якутск)

тичных импульсов-отражений на глубине 3 м и отсутствием отражений от границы грунтов основания на глубине 1,4 м вследствие ее размыва на отметках 84–86 м и 89–93 м.

При строительстве и эксплуатации инженерных сооружений в районах развития многолетнемерзлых пород (ММП) большое значение имеет выявление бугров пучения. На рис. 6 представлен георадиолокационный разрез, пройденный поперек грунтовой автодороги, примыкающий к береговой зоне реки. Выделена граница естественного основания на глубине 1–1,4 м и граница сезонно-талого слоя на глубине 2,4–3,2 м. В отметках

2–10 м выделяется дополнительная граница, образующая замкнутый слой, интерпретируемый как аномальная зона. Локальный участок имеет линзовидную форму мощностью 0,5–0,7 м и характеризует изменение свойств на границе мерзлые и талые грунты. По данным инженерных служб, данный участок в период промерзания и протайки грунтов имеет наибольшее разрушение на поверхности дорожного покрытия. Считаем, что данный объект связан с протекающими криогенными процессами участка и в дальнейшем интерпретируем как участок пучения. Наиболее уверенно на георадиолокационных разрезах они

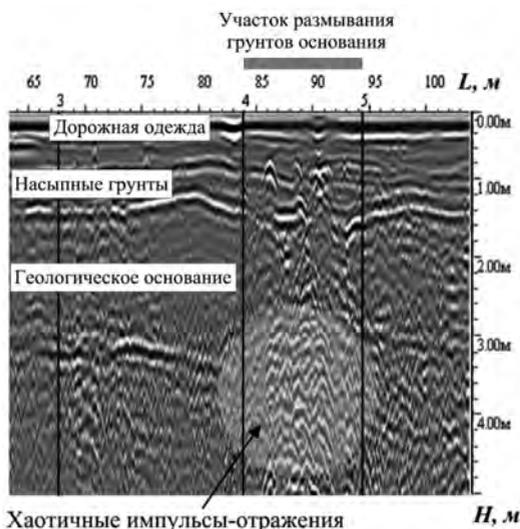


Рис. 5. Пример выявления размыва грунтов на георадиолокационном разрезе участка автодороги ул. Короленко (г. Якутск)

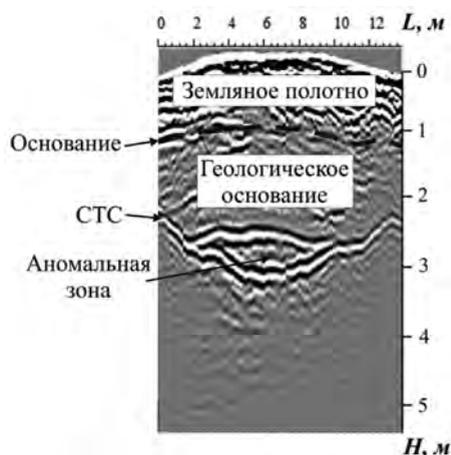


Рис. 6. Пример выявления пучения грунтов на георадиолокационном разрезе

проявляются в процессе промерзания и протаивания грунтов, когда на фоне отражений от границ конструктивных слоев дорожной одежды появляются дополнительные отражающие границы и локальные зоны, связанные с изменением мерзлотно-грунтовых условий участка.

### Методика георадиолокационной диагностики криогенных процессов в грунтах оснований автодорог

На основе выделенных признаков, разработан комплекс оперативной обработки результатов георадиолокационного обследования с использованием набора процедур программного обеспечения «GeoScan32» (ООО «Логис-Геотех», Россия). Комплекс обработки позволяет выделять границы конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна, а также локальные неоднородности (зоны повышенной влажности, разуплотнения грунтов). Для представления данных георадиолокационных измерений

разработано специализированное программное обеспечение, реализующее обработку георадиолокационных сигналов, позволяющего автоматизировать процесс сбора, хранения и обработки полученных данных (рис. 7).

Апробация представленной методики проведена на участке центральной улицы города Якутска. По данным изысканий разрез участка представлен дорожным покрытием до 0,8–1,2 м, ниже до глубины 2,5–3,2 м залегают пески с прослоями супеси и суглинков, далее до 6,4–7,6 м грунты представлены песками в мерзлом состоянии. На глубине 8,3–10 м расположен канализационный коллектор № 1 введенный в эксплуатацию в 1968 г. В настоящее время коллектор не функционирует.

Георадиолокационные исследования выполнены георадаром «ОКО-2» (ООО «Логис», Россия). Для исследования применены антенные блоки с центральными частотами 250 МГц. Для транспортировки антенных блоков применен автомо-



Рис. 7. Программное обеспечение георадиолокационной диагностики грунтов

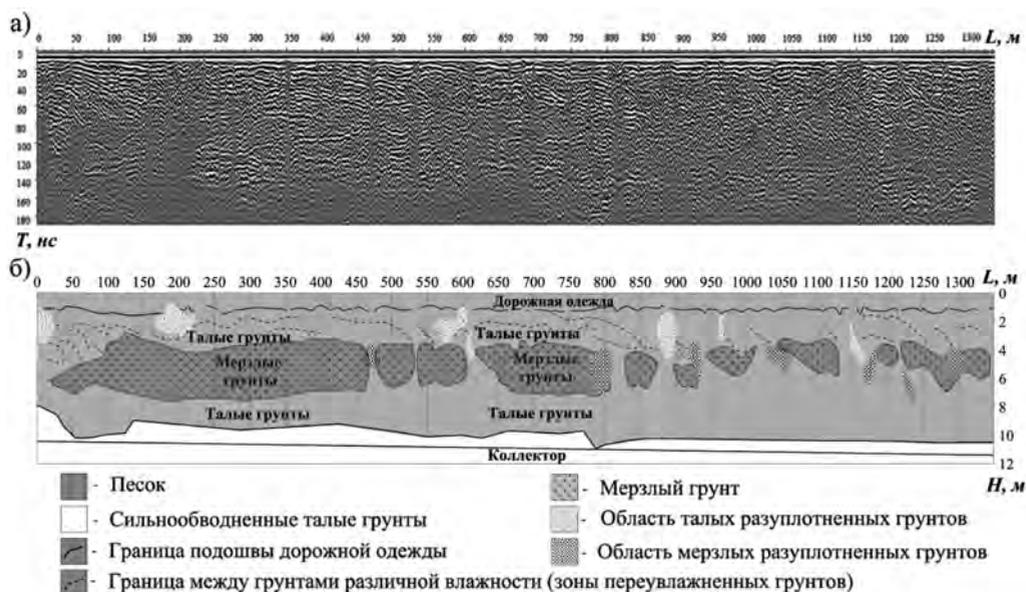


Рис. 8. Интерпретация георадиолокационного разреза на участке исследуемой автодороги: георадиолокационный разрез (а); интерпретационный разрез (б)

биль ГАЗ «Соболь». Скорость движения была не больше 20 км/ч. Георадиолокационные профили проложены по 4 полосам и по центру автомобильной дороги. Привязка георадиолокационных профилей осуществлена на местности по столбам освещения, а также с использованием датчика перемещения с колесом. В результате обработки данных георадиолокации разработанным программным обеспечением построен инженерно-геологический разрез участка исследований (рис. 8, б). Разрез представляет центр автодороги (рис. 8, а).

Анализ данных показал наличие отражений интерпретируемых как зоны переувлажненных грунтов, отмеченные сплошными линиями. По наклонным границам, предположительно, происходит сброс поверхностных и грунтовых вод в мерзлотную толщу. Эти границы выделены на протяжении всего участка дорожного основания в интервале глубин от 1,2 до 4 м.

На всех разрезах выделена мерзлая толща. Выделенный слой мерзлых грунтов по протяженности автодороги имеет

прерывистый характер. Места обрывов, очевидно, связано с разуплотнением мерзлых грунтов основания за счет попадания в эти зоны поверхностных и грунтовых вод с дальнейшим оттаиванием мерзлоты.

В результате получены данные — геометрия разреза, особенности строения дорожного основания, мощность, конфигурация талых и мерзлых зон обусловлены проявлением различных природно-техногенных факторов и их комплексов. Предположительно происходит растепление грунтов и их осадка в оттаявшем состоянии под воздействием собственного веса и вибрации от дорожного транспорта, механическая и фильтрационная суффозия, инфильтрация поверхностных и сезонно-талых вод. Также формирование аномалий связано с утечками воды из систем тепло- и водоснабжения.

### Заключение

Таким образом, разработан комплекс программного обеспечения для георадиолокационных исследований, поз-

воляющий автоматизировать процесс сбора, хранения и обработки георадиолокационной информации, в рамках которого выработаны георадиолокационные признаки — выделения зон обводнения на границах конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна, определения зон разуплотнения грунтов основания земляного полотна, выявления зон пучения грунтов. Применение комплекса программного

обеспечения для георадиолокационной диагностики на примере автодорог Якутии показало эффективность оперативного изучения дорожной одежды и грунтов земляного полотна. Результаты георадиолокационного мониторинга в комплексе с инженерно-геологическими работами позволят обоснованно выработать мероприятия по ликвидации и предупреждению пучения и различного рода просадок дорожного полотна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шепелев В. В., Попенко Ф. Е. Об организации инженерной защиты территории г. Якутска от подтопления и обводнения // Илин. — 2009. — № 3. — С. 31.
2. Кулижников А. М. Теоретические основы и практические результаты применения георадиолокации в дорожной отрасли // Дороги и мосты. — 2009. — Вып. 22/2. — С. 61–74.
3. Scullion T., Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar // J. of Appl. Geophys., 2000. — V.43. — pp. 119–138.
4. Kruglikov A. A., Yavna V. A., Lazorenko G. I., Khakiev Z. B. Investigation of long term moisture changes in roadbeds using GPR / Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014. — pp. 887–891. — Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970549/> (дата обращения: 18 января 2017 г.).
5. Grote K., Hubbard S., Harvey J., Rubin Y. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques // Journal of Applied Geophysics. — 2005. — V. 57. — pp. 129–153.
6. Benedetto A. Tosti F., Schettini G., Twizere C. Evaluation of Geotechnical Stability of Road using GPR // Proceedings of Sixth International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), Aachen, Germany, 2011. — pp. 1–6.
7. Savvin D. V., Fedorova L. L., Omelyanenko A. V. GPR quality control of building and technical state of exploited autoroads in conditions of permafrost / 14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR), 2012. — pp. 546–550. — Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254924/> (дата обращения: 18 января 2017 г.).
8. Саввин Д. В., Омеляненко А. В., Федорова Л. Л., Федоров О. А. Геофизический контроль состояния строения дорожного полотна в условиях криолитозоны / Перспективы развития и безопасность автотранспортного комплекса: Материалы I Международной научно-практической конференции. — Новокузнецк, 2011. — С. 269–274.
9. Fedorova L. L., Sokolov K. O., Savvin D. V., Kulyandin G. A. Analysis of variance amplitudes of signals for detecting structural permafrost heterogeneities by ground penetrating radar / Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014. — pp. 305–308. — Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970433/> (дата обращения: 18 января 2017 г.). **ПЛАБ**

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Федорова Лариса Лукинична<sup>1</sup> — кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, e-mail: Lar-fed-90@mail.ru,  
Саввин Денис Валерьевич<sup>1</sup> — кандидат технических наук, научный сотрудник, e-mail: savvin.denis@inbox.ru,  
Федоров Максим Петрович<sup>1</sup> — научный сотрудник, e-mail: mpfedoroff@gmail.com,

<sup>1</sup> Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН.

L.L. Fedorova, D.V. Savvin, M.P. Fedorov

## GROUND PENETRATING RADAR CAPABILITIES IN FREEZE-AND-THAW PROCESS DETECTION IN MOTOR ROAD BASES

In this article possibilities of diagnostics of cryogenic processes in soils bases of highways are stated by a gpr method. The main wave characteristics of gpr data received by sensing in the areas of deformations of a road bed are provided. At the same time interpretative signs of negative cryogenic processes in soil bases of highways are developed. On the basis of the allocated signs the technique of diagnostics and identification of negative cryogenic processes is offered. A distinctive feature of the proposed technique is automated and operative allocation of borders of constructive layers of pavement and a road bed, and also the local inhomogeneities associated with negative cryogenic processes. The results of application of developed complex software for gpr diagnostics allowing to automate the process of collecting, storing and gpr data processing are provided. The possibility of the developed complex is shown on the example of gpr survey Yakutia highways. The presented technique can be used in road branch for preliminary treatment of negative cryogenic processes of sections of highways when developing projects of their repair and reconstruction.

Key words: ground-penetrating radar (gpr), roads, software, diagnostics, frozen soils, cryogenic processes

DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-195-202

### AUTHORS

Fedorova L.L.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences,  
Assistant Professor, Leading Researcher, e-mail: Lar-fed-90@mail.ru,  
Savvin D.V.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Researcher, e-mail: savvin.denis@inbox.ru,  
Fedorov M.P.<sup>1</sup>, Researcher, e-mail: mpfedoroff@gmail.com,  
<sup>1</sup> Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
677980, Yakutsk, Russia.

### REFERENCES

1. Shepelev V.V., Popenko F.E. *Ilin*. 2009, no 3, pp. 31.
2. Kulizhnikov A.M. *Dorogi i mosty*. 2009, issue 22/2, pp. 61–74.
3. Scullion T., Saarenketo T. Road evaluation with ground penetrating radar. *J. of Appl. Geophys.*, 2000. V. 43. pp. 119–138.
4. Kruglikov A.A., Yavna V.A., Lazorenko G.I., Khakiev Z.B. Investigation of long term moisture changes in roadbeds using GPR. *Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2014. pp. 887–891, available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970549/> (accessed: 18 January 2017).
5. Grote K., Hubbard S., Harvey J., Rubin Y. Evaluation of infiltration in layered pavements using surface GPR reflection techniques. *Journal of Applied Geophysics*. 2005. V. 57. pp. 129–153.
6. Benedetto A. Tosti F., Schettini G., Twizere C. Evaluation of Geotechnical Stability of Road using GPR. *Proceedings of Sixth International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*, Aachen, Germany, 2011. pp. 1–6.
7. Savvin D.V., Fedorova L.L., Omelyanenko A.V. GPR quality control of building and technical state of exploited autoroads in conditions of permafrost. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 2012. pp. 546–550, available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6254924/> (accessed: 18 January 2017).
8. Savvin D.V., Omel'yanenko A.V., Fedorova L.L., Fedorov O.A. *Perspektivy razvitiya i bezopasnost' avtotransportnogo kompleksa: Materialy I Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* (Prospects of development and safety of motor transport complex. Proceedings of I International scientific-practical conference), Novokuznetsk, 2011, pp. 269–274.
9. Fedorova L.L., Sokolov K.O., Savvin D.V., Kulyandin G.A. Analysis of variance amplitudes of signals for detecting structural permafrost heterogeneities by ground penetrating radar. *Proceedings of 15th International Conference on Ground Penetrating Radar*, 2014. pp. 305–308, available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6970433/> (accessed: 18 January 2017).