

УДК 624.131.32
DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-1-41-50

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ГРУНТОВ КРИОЛИТОЗОНЫ

IMPROVING THE COST-EFFECTIVENESS OF MODERN GEOPHYSICAL METHODS OF PERMAFROST INVESTIGATIONS



Д. М. Шестернев,
Забайкальский
государственный
университет, г. Чита
shesdm@mail.ru
shesternev@mpi.ysn.ru

D. Shesternev,
Transbaikal State University,
Chita



П. А. Омельяненко,
Институт мерзлотоведения
Сибирского отделения
Российской академии наук
им. П. И. Мельникова,
г. Якутск
oterpavel@yandex.ru

P. Omelyanenko,
Institute of Permafrost Studies of
the Siberian Branch of the Russian
Academy of Sciences
of P. I. Melnikov, Yakutsk

Отмечено, что применение современных методов геофизики в комплексе инженерно-геологических изысканий позволяет получать более полное представление о горных породах, не увеличивая объем планируемых буровых работ. Выявлено, что особенности суровых природно-климатических условий криолитозоны, изменчивость криогенного состояния верхней части литосферы, специфика геоэкологической обстановки требуют разработки новых методических подходов и адаптации, современных геофизических технологий при решении многообразия задач инженерно-геологического профиля. Установлено, что актуальность данного направления работ непосредственно связана с совершенствованием и разработкой инженерных методов геофизики криолитозоны, что в итоге стимулирует технологическое развитие инженерных изысканий в целом. Рассмотрены вопросы повышения эффективности изучения пород криолитозоны современными методами электроразведки. Показано, что совершенствование современных геофизических технологий и разработка новых методических подходов увеличивают достоверность инженерно-геологической информации в решении актуальных геокриологических задач без повышения и, в ряде случаев, при снижении экономических затрат на производство инженерно-геокриологических изысканий. Сделан вывод, что перспективное направление дальнейших исследований заключается в оптимизации комплексирования геофизических методов диагностики развития криогенных и физико-геологических процессов во вмещающих породах оснований строящихся и эксплуатируемых инженерных сооружений.

Ключевые слова: геофизика криолитозоны; повышение эффективности инженерно-геофизических исследований; технология георадиолокации; мерзлые породы; криолитозона; геофизическое картирование; оптимизация методов инженерной геофизики; геометрия геокриологического разреза; экономические затраты; малоглубинная георадиолокация

It is noted that the use of modern methods of geophysics in the complex of engineering and geological surveys makes it possible to obtain a more complete understanding of the rocks, without increasing the amount of planned drilling operations. It was revealed that the peculiarities of severe natural and climatic conditions of the permafrost zone, the variability of the cryogenic state of the upper part of the lithosphere and the specific geoecological situation call for the development of new methodological approaches and adaptation, and modern geophysical technologies for solving the variety of engineering-geological problems. It is established that the relevance of this area of work is directly related to the improvement and development of engineering methods of geophysics of cryolithozone, which ultimately stimulates the technological development of engineering surveys as a whole. The problems of increasing the efficiency of studying cryolithozone rocks by modern methods of electrical prospecting are considered. It is shown that the improvement of modern geophysical technologies and the development of new methodological approaches increase the reliability of engineering and geological information in solving actual

geocryological problems without increasing and, in some cases, reducing economic costs for the production of engineering-geocryological surveys. It is concluded that a promising direction for further research is to optimize the integration of geophysical methods for diagnosing the development of cryogenic and physico-geological processes in the host rocks of the bases of engineering structures under construction and operation

Key words: permafrost geophysics; GPR-technology; efficiency improvement of geophysical investigations; frozen ground; permafrost zone; geophysical mapping; optimization of diagnostic methods; geometry of permafrost section; economic costs; shallow georadiolocation

Введение. Научные исследования и многолетняя практика применения методов инженерной геофизики в области распространения многолетнемерзлых пород в России [1–6] и за ее пределами [10–15] показали, что для решения фундаментальных и прикладных проблем при хозяйственном ее освоении наиболее эффективны методы электроразведки. Дальнейшее совершенствование этих методов показало, что необходимо продолжить поиск новых технологий, позволяющих решать инженерные задачи при освоении геокриологической среды, мощность которой ограничивается толщиной мерзлых пород, взаимодействующих с инженерными сооружениями. Приоритетные исследования российских ученых показали, что наиболее перспективной по объему и качеству решаемых задач является технология георадиолокации [7–8].

Мерзлые горные породы геокриологической среды, как правило, включают мерзлые рыхлые отложения (далее – МРО) верхней части геокриологического разреза, характеризующиеся сложной криолитогенной структурой, основными компонентами которой являются лед, минеральная составляющая (обломки горных пород) и незамерзшая вода (прочносвязанная и рыхлосвязанная). Прочносвязанная вода внутрипорового пространства ввиду незначительного ее содержания практически не влияет на суммарные радиофизические свойства пород. Основные радиофизические характеристики мерзлых горных пород – скорость распространения и удельное поглощение электромагнитной энергии, которые в значительной степени зависят от количества в породе связующего льда и незамерзшей воды, т. к. лед – высокоско-

ростная непоглощающая среда, а вода – низкоскоростная поглощающая среда. Минеральный скелет мерзлых горных пород по электрофизическим свойствам занимает промежуточное значение. Комплексная оценка базовых данных по электрофизическим свойствам горных пород показывает обоснованность применения георадиолокации при исследовании верхней части разреза МРО геокриологической среды.

В качестве объекта геолого-геофизических исследований МРО представляют интерес породы в пределах глубин годовых колебаний температур до 10...15 м. Именно этот диапазон глубин наиболее актуален для инженерно-геокриологических исследований, в первую очередь, при изысканиях под строительство. Первые метры МРО, включающие слой сезонного оттаивания, содержащий поверхностные криопэги (породы с отрицательными температурами, практически не содержащими лед) в геокриологическом отношении изучены весьма слабо. В то же время слой МРО, как слабо поглощающая немагнитная среда, наиболее приемлем для изучения методами высокочастотной электроразведки для решения практических задач при урбанизации территории криолитозоны.

Методология и методика исследования. Деятельный слой МРО и слой сезонных колебаний температур, как правило, характеризуются неоднородной литологической структурой, повышенной льдистостью, минерализацией, наличием различного рода включений, которые наиболее часто встречаются в пределах слоя с годовыми колебаниями температур примерно до глубины 10...15 м.

Электрофизические свойства МРО существенно зависят от литокриогенного

строения на микроуровне и макроуровне, на который оказывают влияние условия промерзания и геолого-генетические типы отложений. Например, в толщах аллювиальных песков первой надпойменной террасы р. Лена повсеместно встречаются пластовые и жильные льды. В пределах урбанизированных территорий часто формируются несквозные талики и криопэги. В связи с этим в инженерно-геокриологическом смысле толщи МРО не только естественного, но и техногенного (намывные грунты) генезиса представляют наибольший интерес в качестве объекта исследований для решения задач проектирования и строительства инженерных сооружений.

Мощность намывной песчаной толщи, созданной 30 лет тому назад, составляет 10...12 м. Она перекрывает аллювиальные отложения высокой поймы р. Лена. Глубина залегания верхней границы многолетнемерзлых пород в ее пределах до начала строительства составляла 2...3 м. При строительстве намывной толщи предполагалось, что она будет играть роль охлажда-

ющего фактора, и, следовательно, верхняя граница мерзлоты через 5...10 лет будет находиться в этой толще на глубине 3...5 м. Это обеспечит строительство зданий и сооружений с использованием грунтов оснований в мерзлом состоянии, т.е. с использованием Принципа I. В отличие от этой точки зрения, мы сформулировали гипотезу о том, что намывная толща будет оказывать отепляющее воздействие, что приведет к деградации многолетнемерзлых пород на значительную глубину. Для подтверждения данной гипотезы требовалось разработать технологию мониторинга геофизическими методами, что сократило бы время получения информации и снизило бы ее себестоимость. Для решения этой задачи выбран метод георадиолокации, основные технологические параметры которого обеспечивают глубинность исследований и высокую точность дифференциации слоев литологических разновидностей. Реализация метода осуществлялась с применением двухспектрального георадиолокатора ОКО-2М (рис. 1, а, б).



Эксплуатационные параметры: глубина исследований – до 8 м; детальность изучения структур – 0,1 м; измерения с отрывом от поверхности – 0,5 м; время непрерывной работы – 4 ч; скорость перемещения при съемке – 0...50 км/ч; диапазон рабочих температур – -30 °C...+50 °C

Рис. 1. Двухспектральный георадиолокатор ОКО-2М на измерительной тележке для работы на скорости до 5 км/ч (1а); двухспектральная антенна 250...600МГц с блоком управления для работы с поверхности грунта (1б) / Fig. 1. The two-spectral geo-radar OKO-2M on the measuring trolley for operation at speeds up to 5 km/h (1a); two-spectral antenna 250 ... 600 MHz with control unit for working from the ground surface (1b)

Известно, что глубинность изучения пород по выбранной методике обеспечивается потенциалом георадиолокационной системы, зависящим от энергетических составляющих передатчика и приемника в заданном спектре частот, и определяется поглощающими и рассеивающими свойствами пород исследуемой среды. Разрешающая способность обеспечивается отражающими свойствами промежуточных слоев и определяет детальность изучения геокриологического разреза. Результаты математического моделирования, подтвержденные натурными измерениями, показывают, что для детального изучения типового геоэлек-

трического разреза МРО в пределах глубин до 25 м с разрешением по промежуточному слою не менее 0,5 м необходимо обеспечить следующие параметры георадиолокатора: энергетический потенциал более 120 дБ при разрешении по времени менее 15 нс между отраженными сигналами.

Вторым объектом апробации предложенной методики георадиолокационных исследований являлась песчаная толща первой надпойменной террасы р. Лена, в пределах геокриологического стационара «Криопег» Института мерзлотоведения в г. Якутск (рис. 2).



Рис. 2. План криогенного стационара Института мерзлотоведения Сибирского отделения Российской академии наук «Криопег». 1, 2, 3, 4 – направление георадиолокационного профилирования слоя сезонного оттаивания и промерзания пород / Fig. 2. Plan of the cryogenic hospital Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences «Kriopag». 1, 2, 3, 4 – direction of georadialocation profiling of a layer of seasonal thawing and freezing of rocks

Минимальная глубина исследований принципиально зависит от ширины спектра частот зондирующего сигнала и обеспечивается оптимизацией технологии измерений, исключающей динамические перегрузки приемного тракта георадиолокатора. Установлено, что использование спектра частот выше 200 МГц дает достаточное разрешение 0,1...0,5 м для изучения криогенных

процессов промерзания — протаивания пород, включающих высокоминерализованные растворы (криопэги).

Обоснованным и сформулированным ранее расчетным требованиям удовлетворяют принципы построения, разработанные специализированно для изучения МРО аппаратуры, серийно выпускаемой под логотипом «ОКО». В георадарах ряда

«ОКО-2» реализуется оптимальное соотношение параметров излучаемого сигнала для определенных свойств исследуемой геокриологической среды в спектре частот до 250 МГц. Предельные энергетические параметры георадаров ряда «ОКО-2» достаточны для изучения разреза мерзлых горных пород в пределах глубин от 0,5 до 8...15 м в зависимости от свойств породы с разрешением по промежуточному горизонту 0,1...0,5 м [3]. Наряду с использованием сравнительно простой аппаратуры в настоящее время развивается направление работ по созданию мощных программно-аппаратных георадиолокационных комплексов. Особо перспективны исследования, направленные на применение в георадиолокаторах достижений в области специализированной программно-аппаратной обработки сигналов, реализующей методы оптимальной и пространственной временной фильтрации [9], что расширяет возможности интерпретационных предложений [7] при решении многообразия типовых и оригинальных инженерно-геокриологических задач исследования мерзлых горных пород.

Несмотря на достаточную эффективность метода [6], георадиолокационные исследования мерзлых горных пород ограничиваются областью гляциологических и инженерно-геокриологических исследований, что объясняется инерционностью освоения и внедрения новых методов геофизики.

Основное направление георадиолокационных исследований МРО – геофизическое обеспечение комплекса инженерно-геокриологических изысканий. Для реализации этой цели используется априорная геолого-геофизическая информация:

- мощность и литологический состав мерзлых рыхлых отложений;
- структурные особенности и характеристики маркерных горизонтов;
- скоростные и поглощающие характеристики среды.

Основными требованиями, предъявляемыми к материалам георадиолокации в комплексе инженерно-геокриологических изысканий, являются:

- изучение геометрии литологического разреза в пределах заданных глубин;

- дифференциация деятельного слоя разреза;

- оценка достоверности материалов исследований и интерпретации.

Опыт георадиолокационных исследований показал, что наиболее перспективными задачами изучения мерзлых рыхлых отложений являются:

- построение геометрии геокриологического разреза и определение мощности и мерзлых рыхлых отложений;

- картирование МРО и слагающих пород, изучение криогенного состояния;

- определение элементов залегания ледовых комплексов;

- выявление, картирование таликов и криопэгов;

- исследование динамики криогенного состояния пород в условиях техногенного воздействия.

Практически все перечисленные задачи эффективно решаются в условиях плотной промышленной и городской застройки [1].

Георадиолокационные методики измерений развиваются, преимущественно, в двух направлениях: профилирование со вмешанным антенными модулями с программным синтезом апертуры излучения антенн, зондирование разнесенными антennами с обработкой сигналов по методу общей глубинной точки, заимствованному из практики сейсмических работ.

Экономически целесообразно проводить исследования по методу ключевых участков основных геолого-генетических комплексов пород. Участки выбираются с учетом ландшафтного районирования в типичных и аномальных для данного района мерзлотных условиях. Полученная информация используется для построения физико-геологической интерпретационной модели изучаемой среды применительно к инженерной георадиолокации.

Установлено, что эффективность георадиолокационных исследований в инженерной геокриологии определяется следующими факторами: оперативностью измерений, достаточной глубинностью, возможностью

выявления, прослеживания и оконтуривания локальных неоднородностей мерзлых горных пород, достоверностью интерпретации результатов обработки информации.

Для повышения эффективности исследований разработана и апробирована методика георадиолокационной съемки в двух спектрах частот, обеспечивающая расширенные параметры по глубинности, разрешающей способности и достоверности георадиолокационных измерений на объектах криолитозоны. Анализ результатов испытаний показал, что в разных спектрах частот георадиолокация дает взаимодополняющие результаты. Так, в спектре 150 МГц детально прослеживается геометрия геокриологического разреза, а в спектре частот 50 МГц проявляются качественные критерии, ха-

рактеризующие наличие свободной воды в породах и ее азимутальное распределение в отдельных горизонтах.

С целью повышения эффективности георадиолокационных исследований криолитозоны разработана методика наклонных зондирований для изучения свойств грунтов в полевых условиях и совершенствования интерпретационных моделей.

Результаты исследования и область их применения. Разработанная методика апробирована П. А. Омельяненко на объекте для натурного моделирования – геокриологическом полигоне «Криопэг» ИМЗ СО РАН – при изучении геокриологического разреза пород в пределах строительства МКР 203 в г. Якутск и на дражном полигоне одного из рассыпных месторождений Якутии (рис. 3).

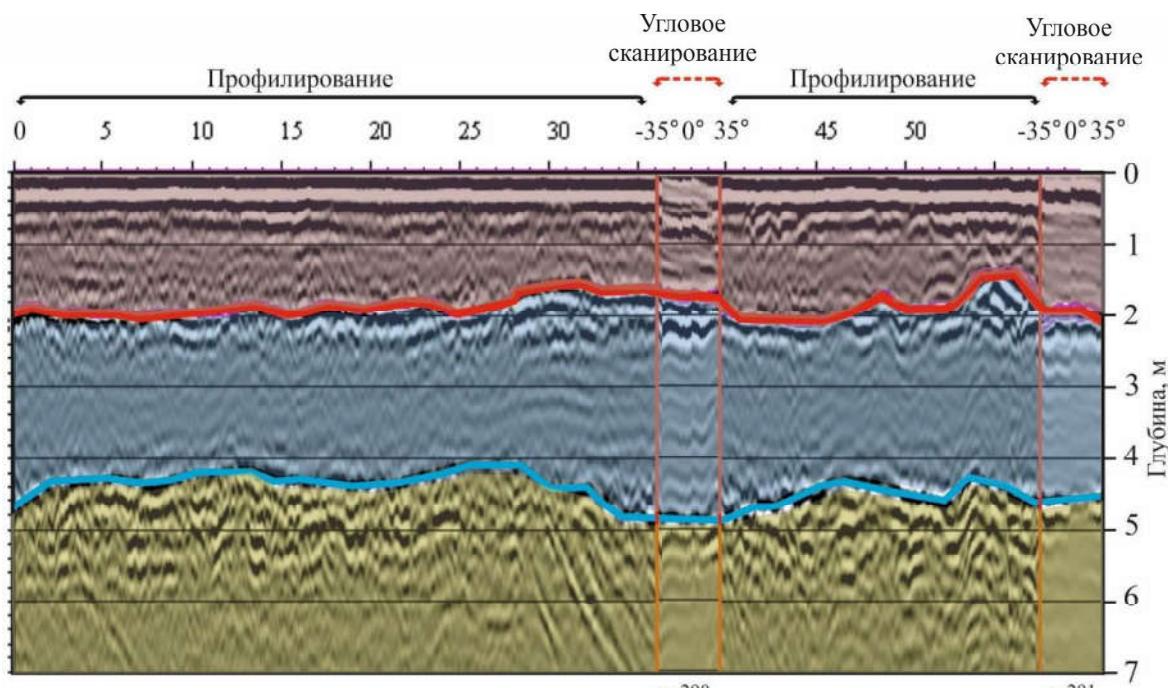


Рис. 3. Фрагмент георадиолокационной съемки на территории дражного полигона одного из месторождений Якутии (красная линия – подошва слоя сезонного оттаивания и промерзания, синяя линия – кровля многолетнемерзлых пород; между ними находится слой немерзлых пород) /

Fig. 3. Fragment of georadar location survey in the territory of a dredging range of one of the deposits of Yakutia (red line is the sole of a layer of seasonal thawing and freezing, blue line is the roof of permafrost, there is a layer of unfrozen rocks between them)

Результаты применения разработанной методики малоглубинной георадиолокации, визуализация которых представлена на рис. 2, показывают:

1) высокое качество установления параметров строения многолетнемерзлых пород в слое годовых колебаний температур;

2) практически экспресс-метод их определения (в отличие от использования горнопроходческих работ для решения этой же задачи);

3) значительное снижение материально-технических затрат при обеспечении высокой точности результатов исследований.

Для повышения точности и достоверности исследований в точках опорных наблюдений проведены георадиолокационные зондирования с GPS-регистрацией точек измерений по разработанной методике угловых сканирований [Патент № 2561769, РФ. Способ георадиолокации в условиях ограниченного пространства / Г. А. Куландин, П. А. Омельяненко; Ин-т горн. дела Севера СО РАН; бул. 2015. № 25]. Измерения проводились методом двухспектральной георадиолокации в спектрах частот 250 и 600 МГц.

На рисунке в интервалах (а) приведен фрагмент георадиолокационной съемки по разработанной методике профилирований и зондирований, в Т290 и Т291 по методике угловых сканирований. В точках зондирований подавлены динамические помехи и достоверно выделены границы горизонтов на глубинах 2 м и $4,5 \pm 0,5$ м. До глубин 1,5...2,5 м прослежен слой сезонного промерзания — протаивания. В пределах глубин 2...4,5 м энергетически выражен и интерпретационно подтверждается горизонт повышенной влажности, что и уточняется в точках зондирований. Предел глубинности измерений по профилю составляет 8...12 м, при этом разрешение 0,2 м с глубиной не меняется.

В результате проведенных многочисленных наблюдений и исследований установлено, что разработанная методика георадиолокационных измерений позволяет интерпретировать геокриологические раз-

резы, включающие обводненные породы и криопэги.

Использование данных опорного буриения повышает достоверность и качество интерпретации материалов исследований.

Установлено, что наличие в разрезе металлических включений (обломки свай, арматуры, обсадка скважин и т.д.) приводит к невосполнимой потере информации.

Результаты, полученные комплексными исследованиями с привлечением электротомографии при изучении развития термосуффозионных процессов в пределах источников подземных вод (местности Улахан-Тарын) показали, что общая глубинность изучения геокриологического разреза методами георадиолокации и электротомографии расширяется до 30 м, при этом георадиолокация представляет детальные данные о геометрии строения разреза в пределах глубин 0,5...15 м, а электротомография с 10 до 30 м характеризует электрофизические свойства пород разреза [12].

Натурные исследования на стационаре «Крионег» позволили экспериментально установить пределы изменения параметров для оптимизации методики и повышения эффективности малоглубинных георадиолокационных исследований:

а) электрическое сопротивление пород <10 Омм — глубинность ограничивается почвенным слоем, электрическое сопротивление пород 10...100 Омм — глубинность ограничивается слоем сезонного протаивания;

б) влажность $<10\%$ — обеспечивается возможность измерений с отрывом от поверхности, влажность $>10\%$ — рекомендуется методика контактных измерений;

в) учет диэлектрической проницаемости почвенного слоя позволяет уменьшить абсолютную ошибку определения глубин до 1 м, или 10...40 % от максимальной глубины изучения геокриологического разреза.

Выводы. В результате проведенных научно-методических исследований показано, что применение двухспектральной георадиолокации повышает достоверность изучения геокриологических разрезов, а комплексирование методов георадиолока-

ции и электротомографии повышает глубинность измерений и информативность результатов исследований в целом. В итоге достигается высокая эффективность геофизических исследований при решении инженерно-геологических задач в пределах распространения многолетнемерзых пород.

Усовершенствованные георадиолокационные технологии обеспечены аппаратуно-программными комплексами и методи-

ками для инженерно-геокриологических исследований.

Перспективное направление дальнейших исследований заключается в оптимизации комплексирования геофизических методов диагностики развития криогенных и физико-геологических процессов во вмещающих породах оснований строящихся и эксплуатируемых инженерных сооружений.

Список литературы

1. Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд. МГУ, 2005. 153 с.
2. Денисов Р. Р., Капустин В. В. Обработка георадарных данных в автоматическом режиме // Геофизика. 2010. № 4. С. 76–80.
3. Дудник А. В. Методы оптимизации энергетического потенциала радиотехнических приборов подповерхностного зондирования [Электронный ресурс]. 2010. 131 с. Режим доступа: <http://www.dissert-cat.com/content/metody-optimizatsii-energeticheskogo-potentsiala-radiotekhnicheskikh-priborov-podpoverkhnost> (дата обращения: 18.12.2017).
4. Ефремов В. Н., Невольских С. Г., Евсеев Б. А., Колеватов А. С. Комплексное применение геофизических методов для картирования сильнольдистых грунтов и повторно-жильных льдов // Инженерные изыскания. 2009. № 11. С. 52–55.
5. Ефремов В. Н. Температурная зависимость сезонных изменений электрического сопротивления многолетнемерзлого грунта // Материалы Четвертой конференции геокриологов России. МГУ им. М. В. Ломоносова, 7–9 июня 2011 г. М.: Университетская книга, 2011. Т. 1. С. 188–191.
6. Иммореев И. Я., Телятников Л. И. Эффективность использования энергии зондирующих импульсов в сверхширокополосной локации // Радиотехника. 1997. № 9. С. 33–37.
7. Клепикова С. М., Монахов В. В., Еременко А. В., Зверов Е. О. Перспективные направления в развитии георадиолокационных исследований // Междунар. науч.-практ. конф. «Инженерная геофизика 2006». Геленджик, 2006. С. 77–78.
8. 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-во Ин-та мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2011. 166 с.
9. Семейкин Н. П., Помозов Н. П., Дудник А. В. Развитие георадаров серии «ОКО» // Вопросы подповерхностной радиолокации. М.: Радиотехника, 2005. С. 231–236.
10. Хакиев З. Б. Определение свойств грунта георадиолокационным методом // III всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». М., 2009. Т. 1. С. 177–181.
11. Ingeman-Nielsen T. Geophysical techniques applied to permafrost investigations in Greenland. Ph.D. Thesis, BYG, DTU R-123, Arctic Technology Centre, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark. 2005. 180 p.
12. Kneisel C., Kääb A., Mountain permafrost dynamics within a recently exposed glacier forefield inferred by a combined geomorphological, geophysical and photogrammetrical approach [Электронный ресурс] // Wiley InterScience, 8 February 2007. 2007. P. 1797–1810. Режим доступа: <http://www.interscience.wiley.com> (дата обращения: 15.12.2017).
13. Vanhala H., Lintinen P., Ojala A. Electrical Resistivity Study of Permafrost on Ridnitšohkka Fell in Northwest Lapland, Finland // Geological Survey of Finland, Betonimiehenkuja 4, FIN-02150 Espoo, Finland (Received: April 2009; Accepted: September 2009), Geophysica (2009), 45(1–2). P. 103–118.
14. Yu Qi-hao, Cheng Guo-dong. Application of Geophysical Methods to Permafrost in China // Journal of Glaciology and Geocryology. 2002-01. P. 217–221.
15. Yu Q. H., Cheng G.D., Wang W.L. The progress of permafrost investigation with geophysical methods in China // Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003. P. 1271–1276.

References

1. Vladov M. L., Starovoitov A. V. *Vvedenie v georadiolokatsiyu* (Introduction to georadiolocation). Moscow: Izd. Moscow State University, 2005. 153 p.
2. Denisov R. R., Kapustin V. V. *Ceofizika* (Geophysics), 2010, no. 4, pp. 76–80.
3. Dudnik A. V. *Metody optimizatsii energeticheskogo potentsiala radiotekhnicheskikh priborov podpoverhnostnogo zondirovaniya* (Methods of optimization of energy potential of radio engineering devices of subsurface sounding). 2010. 131 p. Available at: <http://www.dissertcat.com/content/metody-optimizatsii-energeticheskogo-potentsiala-radiotekhnicheskikh-priborov-podpoverkhnost> (Date of access: 18.12.2017).
4. Efremov V. N., Nevolskikh S. G., Evseev B. A., Kolevatov A. S. *Inzhenernye izyskaniya* (Engineering surveys), 2009, no. 11, pp. 52–55.
5. Efremov V. N. *Materialy Chetvertoy konferentsii geokriologov Rossii. MGU im. M. V. Lomonosova, 7–9 iyunya 2011 g.* (Proceedings of the Fourth Conference of Geocryologists of Russia. Moscow State University named after M. V. Lomonosov. Moscow, June 7–9, 2011). Moscow: University Book, 2011. Vol. 1. P. 188–191.
6. Immoreev I. Ya., Telyatnikov L. I. *Radiotekhnika* (Radio Engineering), 1997, no. 9, pp. 33–37.
7. Klepikova S. M., Monakhov V. V., Eremenko A. V., Zverov E. O. *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Inzhernaya geofizika 2006»* (Intern. scientific-practical Conf. «Engineering Geophysics 2006»). Gelendzhik, 2006. P. 77–78.
8. Neradovskiy L. G. *Temperaturnaya zavisimost signalov georadiolokatsii v osvoennyh rayonah kriolitozony Yakutii* (Temperature dependence of georadarocation signals in the developed regions of the cryolithozone of Yakutia) / otv. ed. G. P. Kuzmin; Ros. acad. Sciences, Sib. Depth, Institute of Permafrost named after P. I. Melnikov. Yakutsk: Publishing House of the Institute of Permafrost P. I. Melnikov, SB RAS, 2011. 166 p.
9. Semeykin N. P., Ponomov N. P., Dudnik A. *Voprosy podpoverhnostnoy radiolokatsii* (Questions of subsurface radar). Moscow: Radio Engineering, 2005. P. 231–236.
10. Khakiev Z. B. *III vseros. konf. «Radiolokatsiya i radiosvyaz»* (III Vosoros. Conf. «Radiolocation and radio communication»). Moscow, 2009. Vol. 1. P. 177–181.
11. Ingeman-Nielsen T. *Geophysical techniques applied to permafrost investigations in Greenland. Ph.D. Thesis, BYG, DTU R-123, Arctic Technology Centre, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark* (Geophysical techniques applied to permafrost investigations in Greenland. Ph.D. Thesis, BYG, DTU R-123, Arctic Technology Centre, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark). 2005. 180 p.
12. Kneisel C., Kääb A. *Wiley InterScience* (Wiley InterScience), 8 February 2007. 2007. P. 1797–1810. Available at: <http://www.interscience.wiley.com> (Date of access: 15.12.2017).
13. Vanhala H., Lintinen P., Ojala A. *Geological Survey of Finland, Betonimiehenkuja 4, FIN-02150 Espoo, Finland* (Received: April 2009; Accepted: September 2009), *Geophysica* (2009), 45(1–2) (Geological Survey of Finland, Betonimiehenkuja 4, FIN-02150 Espoo, Finland (Received: April 2009; Accepted: September 2009), *Geophysica* (2009), 45(1–2)). P. 103–118.
14. Yu Qi-hao, Cheng Guo-dong. *Journal of Glaciology and Geocryology* (Journal of Glaciology and Geocryology), 2002-01, pp. 217–221.
15. Yu Q. H., Cheng G.D., Wang W.L. *Swets & Zeitlinger* (Swets & Zeitlinger), Lisse, 2003, pp. 1271–1276.

Коротко об авторах

Шестернев Дмитрий Михайлович, д-р техн. наук, профессор, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; заведующий лабораторией инженерной геокриологии, Институт мерзлотоведения Сибирского отделения Российской академии наук им. П. И. Мельникова, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия. Область научных интересов: общая и инженерная геокриология, инженерная геофизика, экология криолитозоны, геотехнология
 shesdm@mail.ru
 shesternev@mpi.yandex.ru

Омельяненко Павел Александрович, ведущий инженер лаборатории инженерной геокриологии, Институт мерзлотоведения Сибирского отделения Российской академии наук им. П. И. Мельникова, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия. Область научных интересов: инженерная геофизика, инженерная геокриология, геоэкология
 omerpavel@yandex.ru

Briefly about the authors

Dmitri Shesternev, doctor of technical sciences, professor, Transbaikal State University, Chita, Russia; head of the Laboratory of Engineering Geocryology, Institute of Permafrost Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences named after P. I. Melnikov, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia. Sphere of scientific interests: general engineering, geocryology, engineering geophysics, ecology of permafrost, geo-technology

Pavel Omelyanenko, senior technical assistant, Laboratory of Engineering Geocryology, Institute of Permafrost Studies of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences named after P. I. Melnikov, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia. Sphere of scientific interests: engineering geophysics, engineering geo-cryology, geo-ecology

Образец цитирования

Шестернев Д. М., Омельяненко П. А. Повышение эффективности реализации инженерно-геофизических методов при исследовании грунтов криолитозоны // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 24. № 1. С. 41–50. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-1-41-50.

Shesternev D., Omelyanenko P. Improving the cost-effectiveness of modern geophysical methods of permafrost investigations // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 24, no. 1, pp. C. 41–50. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-1-41-50.

Статья поступила в редакцию: 23.12.2017 г.

Статья принята к публикации: 30.01.2018 г.