

УДК 550.837.2:621.396.6

М.С. Судакова<sup>1</sup>, М.Л. Владов<sup>2</sup>

## СОВРЕМЕННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

В последнее десятилетие в нашей стране георадиолокации посвящены не только научные публикации и производственные отчеты, но и статьи в прессе и сюжеты на федеральных и местных каналах. Рассмотрены три направления применения георадиолокации, которые авторам кажутся перспективными и будут развиваться в дальнейшем: георадарная лучевая томография, комплексирование георадиолокации с другими геофизическими методами и применение георадиолокации для решения геокриологических задач. Приводятся примеры применения различных методик сбора и обработки данных для решения геологических и технических задач.

*Ключевые слова:* электромагнитная томография, комплексирование геофизических методов, псевдотрехмерная съемка, многолетнемерзлые породы.

Ground penetrating radar (GPR) became very popular in the last decade in Russian federation. Not only scientific publications have been devoted to GPR but also articles in the press and TV programs on federal and local channels. Three directions of georadiolocation are considered in the article, which seem promising to the authors and will develop in the future: GPR ray tomography, GPR application with other geophysical methods and GPR using in permafrost regions. Examples of application of different methods of GPR data collection and processing are considered.

*Key words:* electromagnetic tomography, integration of geophysical methods, pseudo-3D survey, permafrost.

**Введение.** Около 10 лет назад георадиолокационный метод изучения геологической среды для нашей страны был технологически новым методом. Сейчас же георадиолокация набрала огромную популярность, ей посвящены не только научные публикации и производственные отчеты, но и статьи в прессе и сюжеты на федеральных каналах. Метод значительно развился, появились или адаптировались из других областей науки новые методики сбора и обработки информации, были выполнены лабораторные исследования, связывающие параметры георадарных данных и механические свойства и состав исследуемых сред, улучшилась аппаратура.

Мы акцентируем внимание на направлениях, в которых георадиолокация наиболее успешно развивается в последние годы и, на наш взгляд, будет продолжать развиваться в сторону увеличения точности определения свойств и числа решаемых задач.

Георадиолокационная томография — новая методика получения и обработки данных, заимствованная из сейсморазведки. Проведение измерений с разным расстоянием между источником и приемником, в частности георадиолокационная томография, позволяет избавиться от неоднозначности интерпретации, характерной для георадиолокации. Результат томографии — количественный: значения скорости распространения

электромагнитных волн, по которым можно не только выявить так называемые аномальные зоны, но и определить влажность слоев и объем пустот. Сложность методики приводит к уменьшению производительности съемки, при этом увеличивается точность определения как свойств, так и размеров аномалий.

**Применение георадиолокации совместно с другими геофизическими методами.** Несмотря на широкую распространенность метода, георадиолокация до сих пор не включена ни в один из типовых комплексов для решения геологических задач. Нет ни нормативных документов, ни методических указаний, регламентирующих применение георадиолокации в составе инженерно-геологических изысканий. Это представляется большим упущением, поэтому здесь мы хотим рассмотреть комплексирование, т.е. ситуации, в которых георадиолокация может дополнить или заменить менее эффективные геофизические методы.

Георадиолокационные исследования зоны вечной мерзлоты актуальны в первую очередь в связи с освоением зоны многолетнемерзлых пород (ММП), вероятностью глобального потепления, исследованием Марса и разработкой новых нефтяных месторождений на Арктическом шельфе. Низкая электропроводность многолетнемерзлых пород обеспечивает успех применения георадиолокации в силу ее большей глубинности относи-

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, науч. с., канд. физ.-мат. н., ИКЗ СО РАН; *e-mail:* m.s.sudakova@yandex.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра сейсмометрии и геоакустики, зав. каф., профессор, докт. физ.-мат. н.; *e-mail:* vladov@geol.msu.ru

тельно немерзлого разреза. Сравнительно, новыми здесь являются исследования, выполненные в зимнее время, и появление аппаратуры, стабильно работающей при низкой температуре.

**Георадиолокационная томография.** Традиционная модификация георадиолокации с совмещенным источником и приемником самая экономичная, менее трудоемкая и как следствие самая используемая. Но интерпретация получаемых данных во многих случаях неоднозначна, а информация о внутреннем строении исследуемой среды в большинстве случаев качественная. Перейти с качественного на количественный уровень можно посредством георадиолокационной томографии, использующей проходящий сигнал для получения количественных электромагнитных характеристик в каждой точке исследуемого пространства.

В настоящее время при изучении трехмерных скоростных неоднородностей наибольшее распространение получили методы лучевой томографии. Процесс решения обратной задачи лучевой томографии представляет собой многократное решение прямой и состоит в подборе такой скоростной модели среды, которая удовлетворяет условию минимальной невязки между наблюдаемыми и рассчитанными значениями времени прихода волн в приемную антенну. Процесс томографического обращения происходит в специальном программном обеспечении (Reflexw, Geotom CG и пр.).

Вследствие большого затухания высокочастотных электромагнитных волн в геологическом разрезе расстояние между скважинами, в которых проводится георадарная томография, обычно не больше 10 м, и задачи межскважинного георадиолокационного просвечивания, связанные с состоянием и свойствами грунтов и пород, в основном носят научный характер: оконтуривание корней деревьев [Butnag et al., 2006], мониторинг количества воды, проникающей в почву и испаряющейся в течение меняющихся сезонов [Farmani et al., 2007], определение водопроницаемости в разрезе [Tronicke et al., 2002] и пр. Точки физических наблюдений находятся в скважинах и/или на поверхности, в скважинах используются специальные дипольные антенны.

Практических результатов георадиолокационная томография достигает в области неразрушающего контроля зданий и инженерных сооружений, для чего используются стандартные высокочастотные антенны типа бабочки (рис. 1), для поиска пустот, заполненных воздухом [Судакова и др., 2017]. Здесь ее применение более успешно, чем применение аналогичных акустических исследований, так как, во-первых, воздушная полость для электромагнитных волн представляет собой высокоскоростную аномалию, что по принципу Ферма обеспечивает высокую плотность лучей, а во-вторых, методика георадарной съемки такова, что источник (или приемник) может двигаться

непрерывно, тем самым обеспечивая сколь угодно большое количество лучей (в пределах разрешающей способности метода), в отличие от акустической томографии, когда все источники и приемники занимают строго отведенное им положение.

В работе [Wendrich et al., 2006] приводится сравнение ультразвуковой и георадарной томографии для поиска небольших пустот (около  $20 \times 10$  см) в кирпичной стене. Погрешности определения скорости в воздухе в результате применения ультразвука (2500 м/с против истинных 330 м/с) намного больше, чем для радара (24 см/нс против истинных 30 см/нс). Такие большие погрешности, в отличие от результатов георадиолокации, могут затруднить или сделать невозможными обнаружение и идентификацию скоростной аномалии.

В работе [Судакова и др., 2017] георадарная томография была применена для оконтуривания полости, занимающей около 20% объема колонны: здесь ошибка в определении скорости не превышает 4 см/нс, а в определении площади пустоты в плане — 2%. Кроме характеристик полости, также была определена скорость распространения электромагнитных волн внутри твердой части колонны. Получение детального распределения скорости электромагнитных волн внутри конструкции открывает возможность расчета физических параметров, таких, как влажность, пористость, прочность и пр., и здесь открываются большие перспективы для георадарной томографии.

**Комплексирование георадиолокации с другими геофизическими методами.** По количеству и точности получаемой информации георадиолокация аналогична или превосходит сейсморазведку, а по скорости получения информации о разрезе, по трудозатратам и, соответственно, стоимости работ опережает все геофизические методы. В большинстве случаев георадиолокация используется совместно с искусственными геофизическими методами — сейсморазведкой и электроразведкой. С гравиразведкой, магниторазведкой, ядерной геофизикой и другими геофизическими методами у георадиолокации мало точек соприкосновения как по физической природе полей, так и по глубинности и размерам выделяемых аномалий. В комплексировании георадиолокация может применяться при решении задач, ограниченных 15–20 м по глубине: в инженерной геологии, геокриологии, гляциологии, археологических и технических изысканиях.

**Совместное применение георадиолокации и сейсморазведки.** Георадиолокация и сейсморазведка — два детерминистических метода, использующих лучевое приближение. Временные георадиолокационные и сейсмические разрезы могут быть полностью идентичны или различаться в деталях вследствие разной природы поля. Методика сейсморазведки предполагает работу с разным расстоянием между источником и приемником, что обе-

спечивает не только выделение границ, но и определение их глубины и идентификацию по скорости. Очевидное преимущество георадиолокации перед сейсморазведкой заключается в ее мобильности, меньшей трудоемкости и более легкой методике исследования. При планировании эффективного комплекса целесообразно проводить сейсморазведочные работы на опорных участках для точной привязки георадарных границ по глубине и их идентификации. Второе преимущество георадиолокации заключается в меньшей длине волны, что позволяет детальнее охарактеризовать разрез, например, разделить на фации, изучить внутреннюю структуру отложений и неровности границ.

На рис. 2 приведен пример эффективного комплексирования георадиолокации и сейсморазведки МПВ для исследования разреза многолетнемерзлых пород в летний период в районе Кумжинского месторождения в дельте р. Печора [Садуртдинов и др., 2016]. На георадиолокационном разрезе хорошо прослеживается ряд осей синфазности отраженных волн. Для получения данных о глубине основных отражающих границ и их идентификации выполнены сейсмические исследования на характерных участках профиля. Было определено положение в разрезе границ, которые по значениям скорости сейсмических волн однозначно идентифицируются как кровля ММП и кровля зоны полного водонасыщения. Полученные данные подтверждены данными бурения. Кроме границ, выделяемых по сейсмическим данным, на всем протяжении георадарного профиля на глубине 1 м прослежена подошва нефтяного загрязнения в песках, на отдельных участках профиля выделен ряд границ в толще талых пород; в толще многолетнемерзлых пород прослежено отражение, соответствующее физической или литологической границе. В результате комплекс георадиолокации и сейсморазведки показал высокую эффективность

А



Б

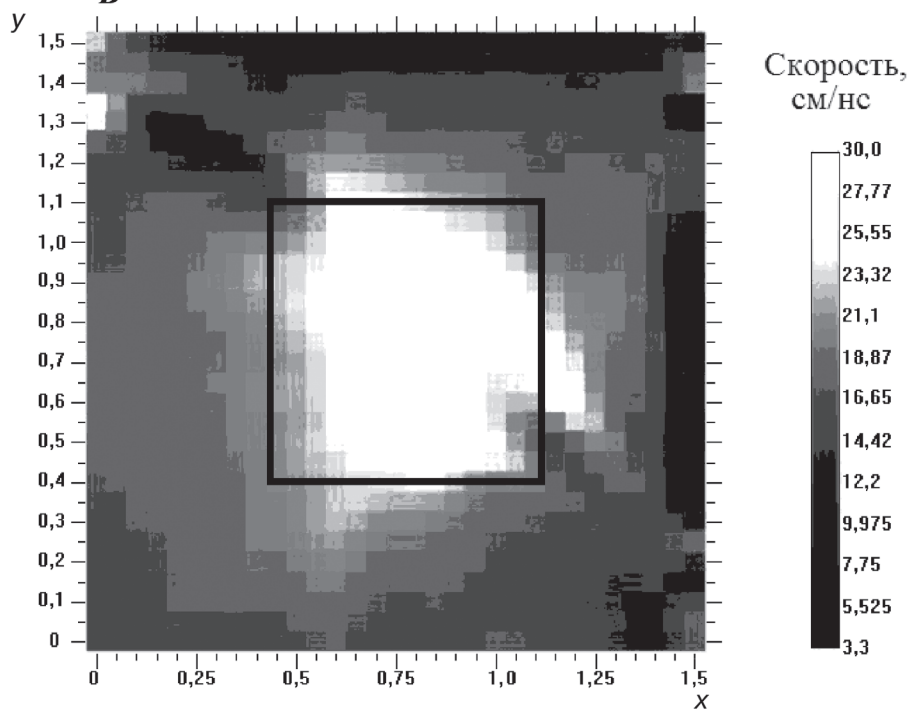


Рис. 1. Фото колонны главного здания МГУ имени М.В. Ломоносова (А) и томографический срез в плоскости, показанной белой линией (Б). Георадар «Зонд-12е», антенны 1500 МГц и 2000 МГц, по [Судакова и др., 2017]. Белое в квадрате — положение известной пустоты

для изучения особенностей геологического разреза и определения природы исследуемых границ.

**Совместное применение георадиолокации и электроразведки.** Георадиолокация и электроразведка используют одно и то же поле, но принципиально разные модели его распространения в среде: электроразведка в большинстве случаев оперирует квазистационарным приближением, тогда как георадиолокация — волновым подходом. В георадиолокации нет принципа эквивалентности, размер

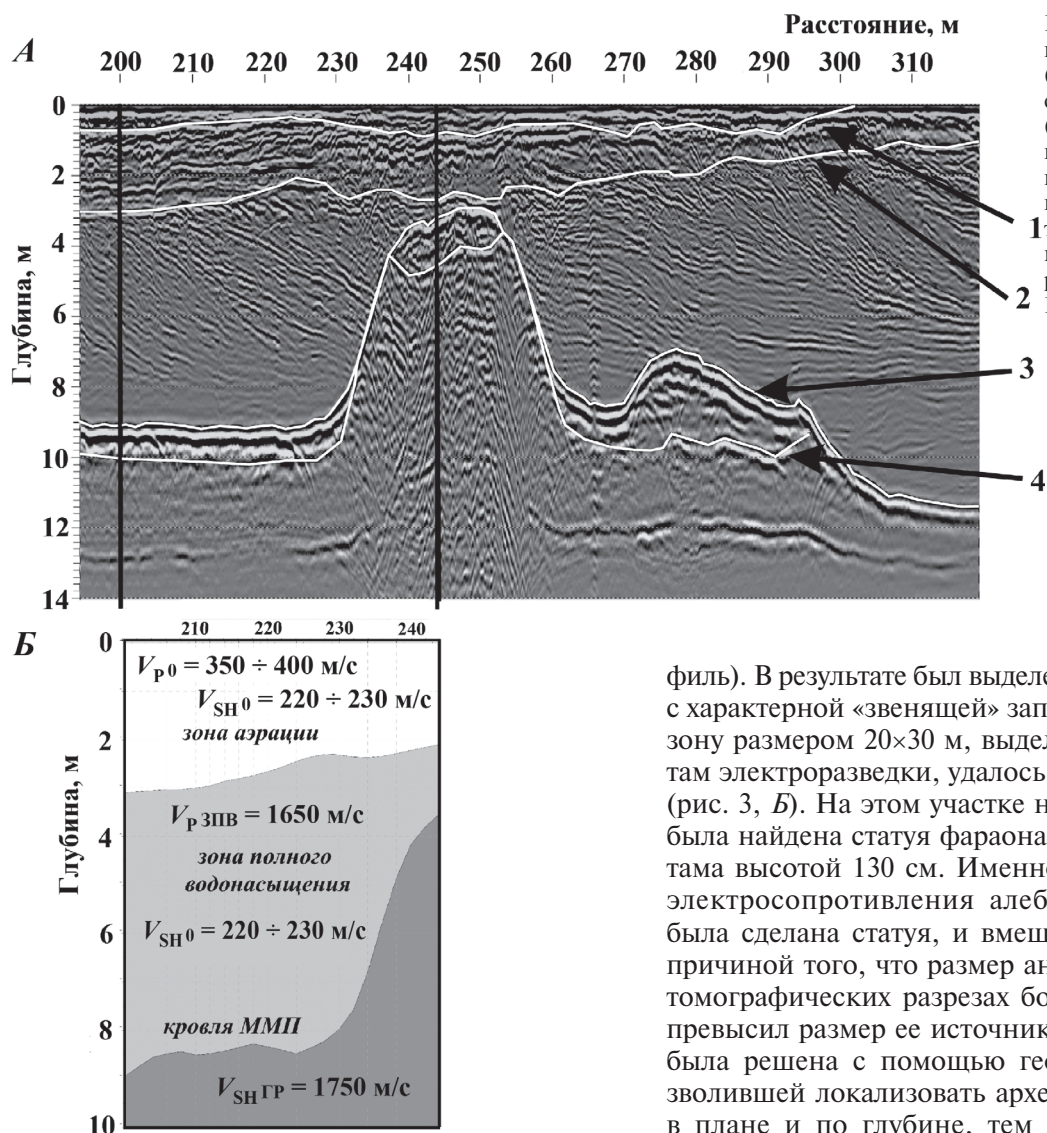


Рис. 2. Глубинные разрезы: георадиолокационный (А) с интерпретацией и сейсмогеокриологический (Б), антенна 300 МГц, георадар «Зонд-12е»: 1 — граница загрязнения в песках; 2 — уровень грунтовых вод; 3 — кровля многолетнемерзлых пород; 4 — граница в толще ММП, по [Садуртдинов и др., 2016]

объекта на георадарных данных зависит только от его физических размеров и геометрии и не зависит от контрастности свойств. При комплексировании георадиолокации может быть использована для определения глубины электромагнитных границ и размеров локальных объектов, для уточнения значений сопротивления, полученного по данным электротомографии.

В работе [Elsayed et al., 2014] приведен пример комплексирования электрической томографии и георадиолокации для поиска археологических объектов на территории известного исторического памятника Старый Луксор (Египет) непосредственно за так называемыми поющими статуями Мемнона. По результатам электротомографии на участке исследования размером около  $150 \times 150$  м на нескольких соседних профилях была выделена высокоомная аномалия (до 2000 Ом·м), которая может быть интерпретирована как погребенный археологический объект (рис. 3, А). На втором этапе исследования в области с высокоомной аномалией  $40 \times 30$  м проводилась георадиолокационная съемка по частой сети профилей (всего 81 про-

филь). В результате был выделен объект дифракции с характерной «звонящей» записью, и аномальную зону размером  $20 \times 30$  м, выделенную по результатам электротомографии, удалось уменьшить до  $3 \times 2$  м (рис. 3, Б). На этом участке на глубине около 3 м была найдена статуя фараона с головой гиппопотама высотой 130 см. Именно большой контраст электросопротивления алебаstra, из которого была сделана статуя, и вмещающего грунта стал причиной того, что размер аномалии на электротомографических разрезах более чем на порядок превысил размер ее источника. Задача уточнения была решена с помощью георадиолокации, позволившей локализовать археологический объект в плане и по глубине, тем самым значительно уменьшив объем археологических работ.

**Совместное применение сейсморазведки, георадиолокации и гравиразведки.** В работе [Hausman et al., 2007] описано редко встречающееся комплексирование георадиолокации, гравиразведки и сейсморазведки. Была поставлена задача построить модель ледника в Австрийских Альпах (г. Инсбрук), включающую его структуру, мощность, льдистость и плотность для вычисления скорости его движения.

По результатам сейсморазведки в исследуемой среде было выделено 3 слоя (рис. 4, модель М0): верхний выветрелый слой (скорость продольных волн 950 м/с), тело ледника со скоростью продольных волн 3100–3500 м/с и нижний слой, представленный скальным основанием ледника, которое сложено выветрелыми гнейсами, со скоростью 4100 м/с. Георадарные исследования показали наличие сильного рефлектора R1 — отражения от слоя воды под ледником. Наблюдалось значительное расхождение по глубине границ, выделенных по сейсморазведочным данным, и рефлектора R1. В результате сейсмических исследований, проведенных по методу  $t_0$ , талый слой не может быть

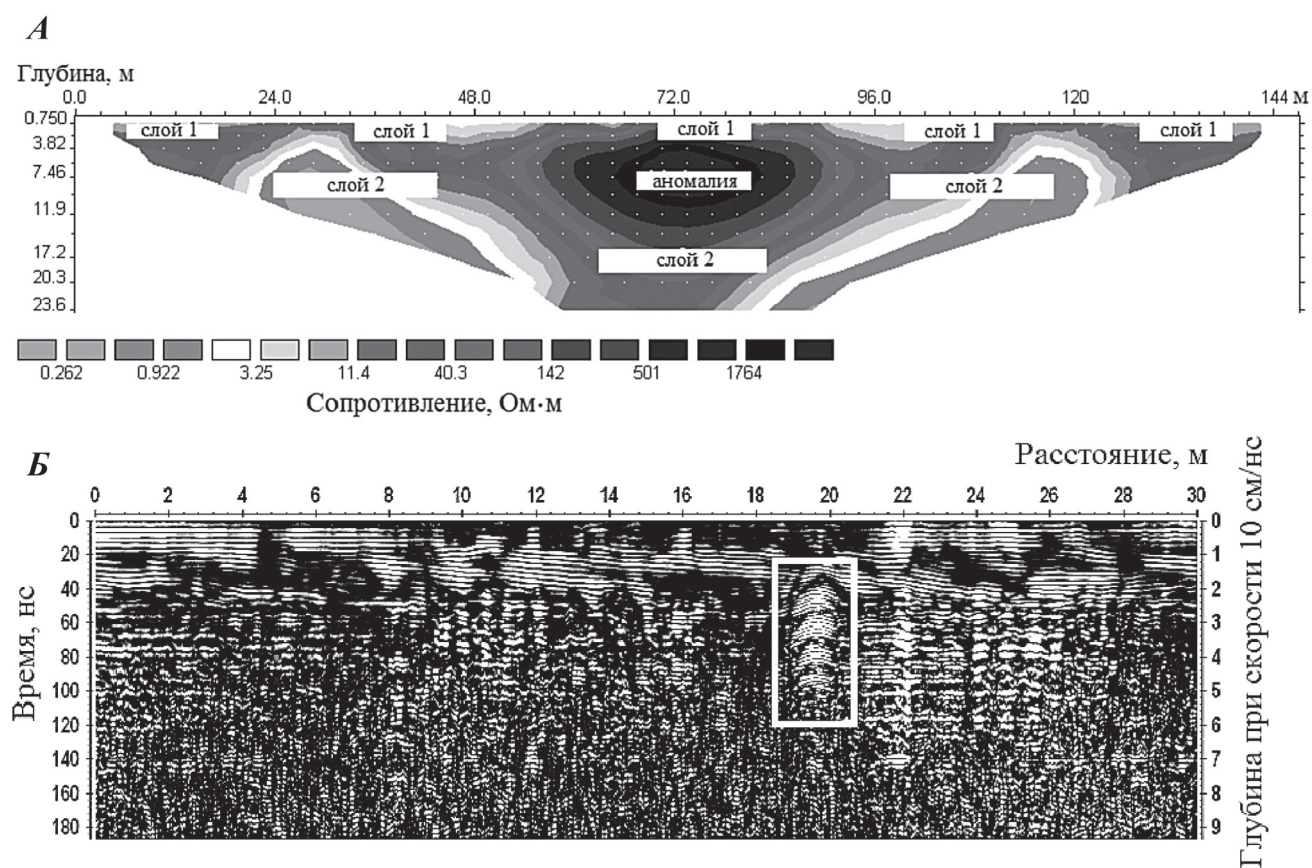


Рис. 3. Результат электротомографии (А) и георадарограмма (В), полученная на центральной части профиля. Георадар «Sir-2000», антенна 200 МГц, по [Elsayed et al., 2014]

выделен: наблюдается эффект выпадения слоя. С учетом данных георадиолокации и сейсморазведки была построена новая четырехслойная модель, включающая в себя слой со скоростью 1500 м/с, кровля которого с незначительной погрешностью совпала с положением границы R1. Эта четырехслойная структурная модель ледника была использована для насыщения ее гравиметрической информацией о плотности слоев, содержании чистого льда в леднике и для построения сводного геолого-геофизического разреза (рис. 4, В). По формуле Глена была вычислена скорость течения ледника, которая составила около 3 м в год и оказалась равной вычисленной ранее по аэро- и космическим фотоснимкам.

Применение каждого метода было необходимо для определения независимых характеристик ледника, которые в комплексе позволили решить сложную геологическую задачу.

**Георадиолокационные исследования зоны вечной мерзлоты.** Область развития многолетнемерзлых пород занимает обширную площадь нашей планеты. Почти 40% суши и шельфа занято криолитозоной. В России она занимает примерно 65% территории, включая многие важнейшие горнорудные, нефтяные, угольные и другие районы разведки, разработки и добычи полезных ископаемых. Это выдвигает изучение мерзлых пород и льдов в число важнейших мировых на-

учно-практических проблем. Перед исследователями стоят не только научные задачи, связанные с изучением и наблюдением многолетнемерзлых пород, но и множество практических, связанных со строительством, прокладкой дорог и трубопроводов, бурением разведочных и промысловых скважин в зоне развития ММП и пр. В последние десятилетия на повестке дня стоит вопрос о деградации мерзлоты, связанной с глобальными изменениями климата.

При переходе температуры горной породы через 0 °С практически скачкообразно происходят глубокие качественные преобразования, меняются физические и, соответственно, геофизические свойства. В частности, на порядки падает проводимость, в несколько раз — диэлектрическая проницаемость.

Различия в электрических свойствах льда, воды, воздуха и грунта позволяют успешно применять георадар при изучении верхних 30 м разреза криолитозоны, а в ряде случаев и больше (при понижении частоты). Граница фазового перехода воды очень контрастна для высокочастотных электромагнитных волн, изолирующие свойства льда обеспечивают малые потери, следовательно, и большую глубину проникновения электромагнитного сигнала.

В области развития криолитозоны с помощью георадиолокации успешно решаются задачи,

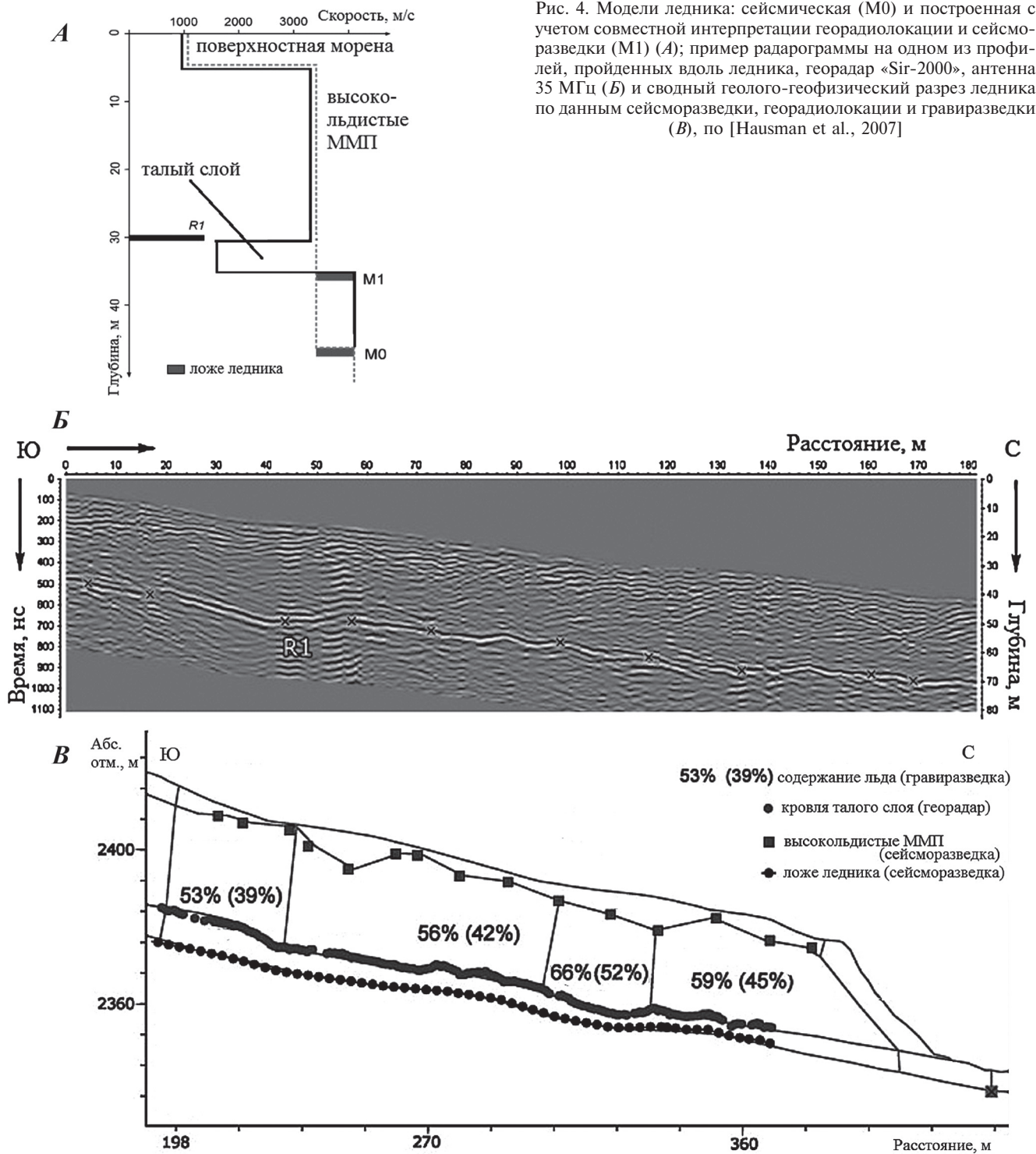


Рис. 4. Модели ледника: сейсмическая (M0) и построенная с учетом совместной интерпретации георадиолокации и сейсморазведки (M1) (А); пример радарограммы на одном из профилей, пройденных вдоль ледника, георадар «Sig-2000», антенна 35 МГц (Б) и сводный геолого-геофизический разрез ледника по данным сейсморазведки, георадиолокации и гравиразведки (В), по [Hausman et al., 2007]

связанные с определением положения границы мерзлое–талое и ее мониторингом. В большинстве случаев эти работы посвящены картированию кровли ММП, которой соответствует высокоамплитудное отражение, ниже которого не прослеживаются какие-либо продолжительные рефлекторы. Кроме задач картирования, георадиолокация может применяться для поиска локальных объектов, например замерзших мамонтов [Makino, Miura, 2005].

С появлением космических программ, связанных с изучением Марса, обсуждается роль в них

георадиолокации, где основная цель ее применения — поиск воды в замороженном состоянии. Исследование земных многолетнемерзлых пород может проводиться как аналог работ на Марсе для тестирования специальной аппаратуры [Berthelier, 2003]. При комплексировании в большинстве случаев при решении геокриологических задач георадиолокация сочетается с электроразведочными методами [Fortier, 2010], реже с сейсморазведкой [Садуртдинов и др., 2016].

Ограничения георадиолокации не зависят от места ее применения — затруднительно или невоз-

можно определить положение подошвы активного слоя в случае, если он представлен глинистыми или засоленными грунтами с повышенной проводимостью. Граница мерзлое–талое в области развития островной мерзлоты может иметь сложную трехмерную форму, поэтому для интерпретации данных, полученных в области развития островной мерзлоты, может понадобиться дополнительная информация. Многие задачи в области развития ММП для георадиолокации до сих пор нетривиальны, в частности, к ним относятся трехмерная (или псевдотрехмерная) съемка и построение карт границ фазового перехода, определение влажности деятельного слоя и льдистости мерзлых пород, мониторинг изменения физических свойств и пр., немногочисленны и работы, проводимые в зимнее время. Хотя, учитывая повышенную глубинность именно в зимний период (когда такая «сильная» граница, как подошва протайки отсутствует), георадиолокация могла бы быть использована для определения положения подошвы мерзлоты.

Включение георадиолокации в обязательный комплекс исследований должно значительно упростить определение мощности активного слоя, например, на научных стационарах, а также расширить область мониторинга, где вследствие большой глубины протайвания это невозможно, как и бурение по частой сетке.

**Поиск областей повышенной льдистости.** В работе [De Pascale et al., 2008] описан поиск областей с повышенной льдистостью в суглинках в зимнее время, ее авторы акцентируют внимание на преимуществах работы в сезон отрицательных температур, когда меньше не только потери энергии, но и тверже поверхность, по которой перемещаются исследователи и аппаратура. В работе приводится пример комплексирования георадиолокации и

электроразведки; авторы отмечают, что аппаратура стабильно работала до  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На полученных георадиограммах выделяются области повышенной амплитуды, которые соответствуют областям повышенного сопротивления и могут быть с уверенностью интерпретированы как массивный лед или области с повышенной льдистостью. На участках разрезов, где зафиксированы пониженные значения электросопротивления, амплитудные аномалии отсутствуют. Здесь наблюдается характерное понижение в рельефе, по всем признакам это область проседания из-за протайвания (термокарста), имеющего место в прошлую геологическую эпоху.

**Определение влажности в активном слое.** Контроль содержания воды в почве с использованием прямых методов, таких, как прямое гравиметрическое измерение, — трудоемкий или же обеспечивает значения влажности только в отдельных точках среды и характеризует только приповерхностный слой. Диэлектрическая проницаемость — функция содержания воды, поэтому временные и латеральные изменения влажности почвы можно контролировать с помощью георадара. Для этого необходимо знать скорость распространения электромагнитных волн, которую с помощью подходящей корреляционной зависимости можно пересчитать в объемную влажность. В работе [Судакова и др., 2017] приведено сравнение карт объемной влажности активного слоя, полученной по георадарным данным, и весовой влажности приповерхностного слоя на глубине 20 см, измеренной гравитационным способом (рис. 5). Мощность активного слоя на участке работ от 20 до 140 см.

Характерные участки с высокой и низкой влажностью практически совпадают: на обеих картах северо-западная часть участка характеризуется самыми высокими значениями влажности.

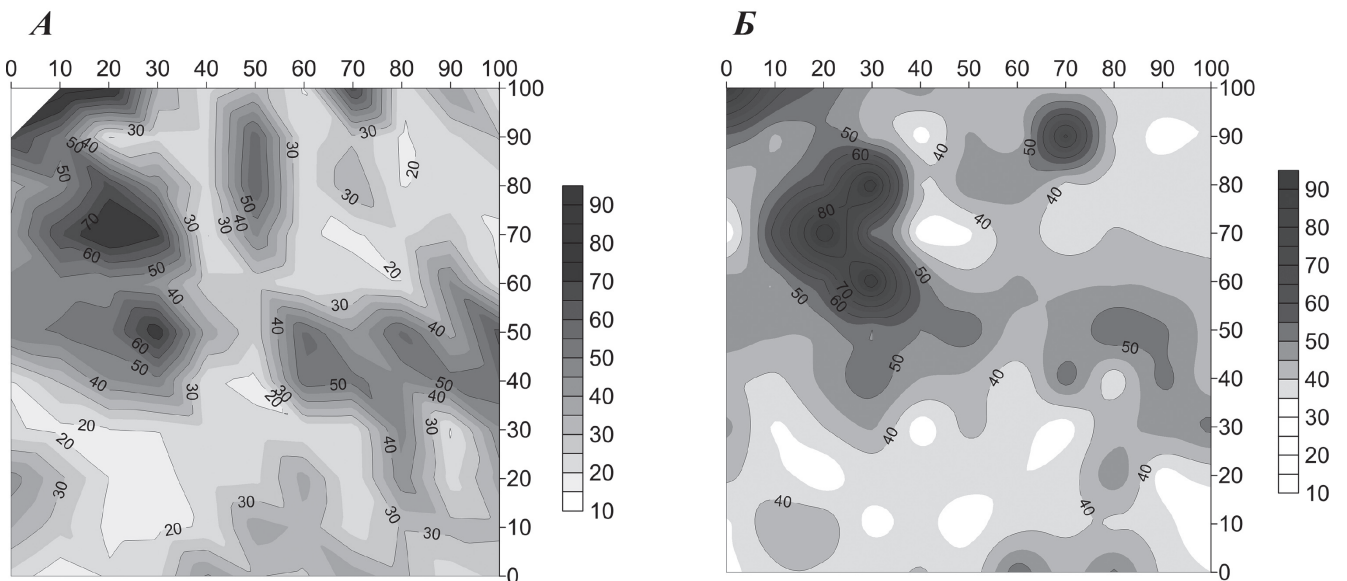


Рис. 5. Карты влажности активного слоя: А — весовая влажность, прямые наблюдения, глубина 20 см; Б — объемная влажность (результат георадиолокации, глубина от 20 до 140 см), по [Судакова и др., 2017]

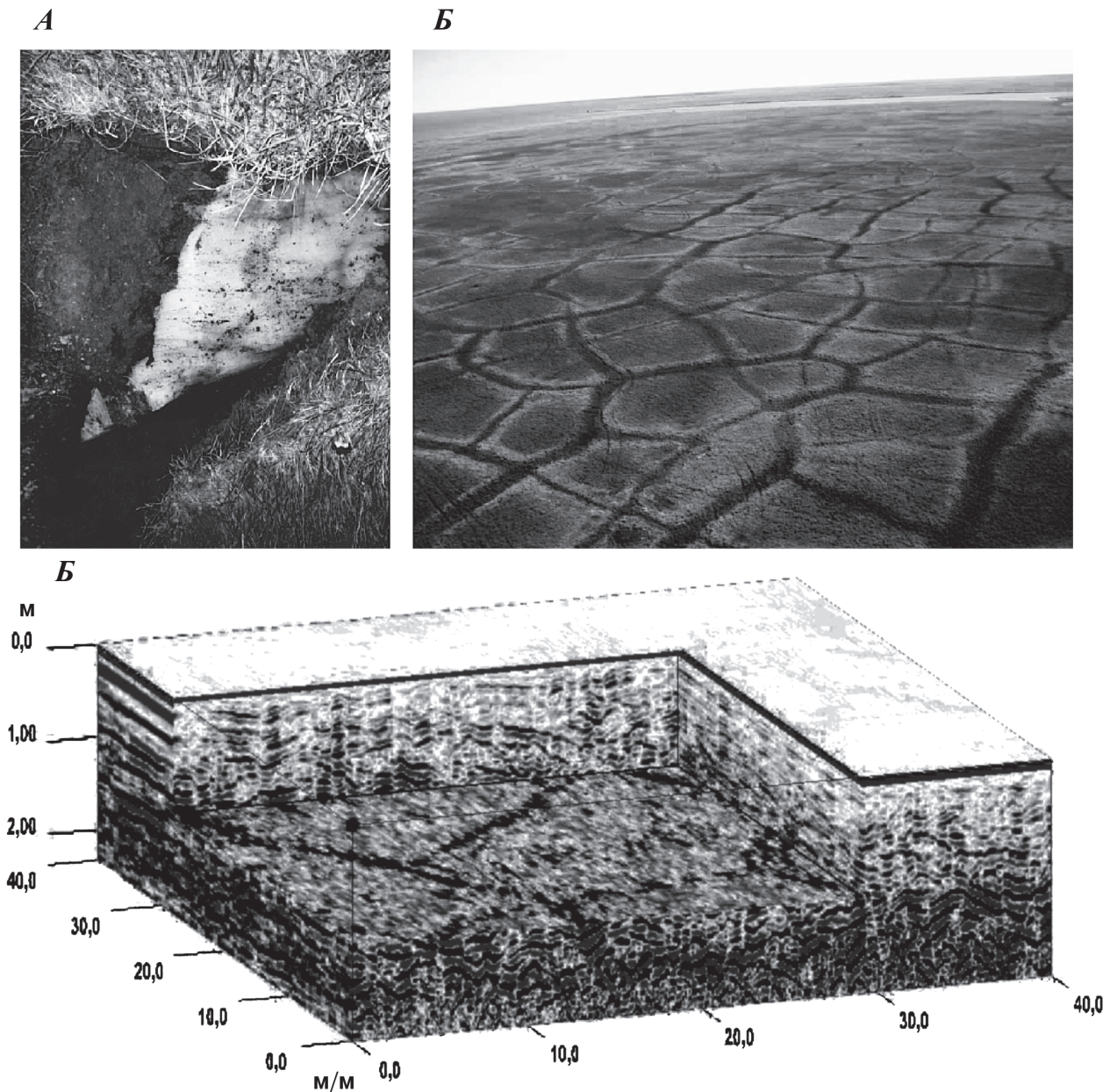


Рис. 6. Фото жилы льда клиновидной формы (А), вид области распространения полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) сверху (Б). Трехмерный куб данных, полученный на участке распространения ПЖЛ, георадар «Sir-3000», антенна 400 МГц, средняя скорость в разрезе 13 см/нс, по осям — расстояние, м, по [Munroe et al., 2007]

Значения объемной влажности больше весовой, что принципиально правильно, так как весовая характеризует только приповерхностный слой, а полученная по данным георадиолокации — весь активный слой, включая зону полного водонасыщения. Сходство карт влажности, полученных по данным георадиолокации и по прямым наблюдениям, позволяет сделать вывод о целесообразности применения георадиолокации для оценки площадной изменчивости влажности пород в талом слое. В таком случае можно отказаться от прямых измерений весовой влажности приповерхностного слоя или уменьшить их объем.

**Применение трехмерной визуализации.** В некоторых случаях трехмерная визуализация гео-

радиолокационных данных может значительно облегчить интерпретацию, анализ структурных и стратиграфических особенностей исследуемой среды. Для построения 3D-изображений относительно небольшие площади (от 5 до 50 м<sup>2</sup>) покрывают сетью близко расположенных (как правило, от 0,2 до 1 м) параллельных георадарных профилей. Плотная сеть профилей необходима для правильного отображения геометрии и размера различных особенностей разреза, уменьшения неоднозначности и вероятности появления артефактов, связанных с некорректной интерполяцией. При интерпретации данных псевдотрехмерной съемки анализируются амплитудные особенности на горизонтальной плоскости, которые представ-



ляют собой индикатор изменений свойств грунта или каких-либо особенностей разреза (нарушения, несогласия, локальные объекты, включения и пр.).

В работе [Munroe et al., 2007] приведен пример применения псевдотрехмерной съемки для определения пространственно-глубинного расположения полигонально-жильных льдов на Аляске. Авторы этой работы отмечают, что выделение ледяных жил, скрытых под растительным слоем, на двумерных радарных профилях невозможно, и в их исследовании методы 3D-визуализации помогли снизить неопределенность интерпретации и определить геометрию сети распространения ледяных клиньев. Работы проводились ими в зимнее время, чтобы снизить затухание в приповерхностном слое. На рис. 6 представлен куб данных, полученный на одном из участков исследования. На двумерных профилях видна структура разреза: первая ось синфазности сверху соответствует подошве снежного покрова, следующая — подошве органического слоя. Ниже залегает слой песчаных озерных отложений, характеризующийся волновой картиной с субгоризонтальными или слабонаклонными осями синфазности. Наличие множества гипербол дифракций в нижней части георадарограмм свидетельствует о большом количестве гравийного материала в подошве этого слоя. Результаты интерпретации подтверждаются данными бурения, проведенного до глубины 110 см. На двумерных разрезах ледяные жилы и клинья не выделяются, однако на срезах в горизонтальной плоскости отчетливо видны границы полигонов — отражения от жил льда (черные полосы).

Приведенный пример иллюстрирует успешность применения псевдотрехмерной георадарной съемки для решения задачи отображения ледяных структур в приповерхностном слое в условиях криолитозоны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Садуртдинов М.Р., Малкова Г.В., Скворцов А.Г.* и др. Современное состояние островной мерзлоты в пойме реки Печора (Ненецкий автономный округ) по результатам комплексных геокриологических и геофизических исследований // Мат-лы 5-й конференции геокриологов России «Геотехника в криолитозоне» 14–17 июня 2016, МГУ, Москва. М., 2016.

*Судакова М.С., Калашиников А.Ю., Владов М.Л.* и др. Поиск конструктивных пустот в строительных конструкциях методом георадиолокации // Геотехника. 2017. № 2. С. 30–37.

*Судакова М.С., Калашиников А.Ю., Терентьева Е.Б.* Исследование возможностей георадарной томографии для поиска воздушных полостей в инженерных конструкциях // Дефектоскопия. 2016. № 9. С. 50–59.

*Судакова М.С., Терентьева Е.Б., Калашиников А.Ю.* Поиск и определение размеров конструктивных пустот с помощью георадарной томографии на примере двух колонн // Междунар. журн. по расчету гражданских и строительных конструкций. 2017. Т. 13. № 1. С. 94–109.

**Заключение.** Метод георадиолокации уверенно развивается в сторону усложнения методики сбора и обработки данных с целью получения не только информации о структуре разреза, но и о распределении электромагнитных и механических свойств в нем.

Независимо от того, основным или вспомогательным методом является георадиолокация в комплексе геофизических исследований, при грамотной постановке методики ее использование делает комплекс более эффективным или полностью определяет его успешность. В задачах, для которых требуется большая глубинность, георадиолокация может быть использована для детального изучения верхней части разреза.

Для решения задач исследования криолитозоны использование георадиолокации весьма целесообразно в качестве основного или дополнительного инструмента изучения инженерно-геокриологических условий. По сравнению с другими геологическими или геофизическими методами георадиолокация позволяет детальнее определять геометрию геологических границ, структуру разреза, физические свойства.

В области неразрушающего контроля развивается метод георадиолокационной томографии, с помощью которого удастся получить данные не только о наличии и размерах пустот, но и о физических свойствах исследуемого объекта. Получаемая с помощью георадиолокационной томографии информация более достоверна, чем полученная при работе с совмещенными источником и приемником. Результаты исследований позволяют сделать вывод о том, что метод георадиолокации необходимо использовать при реконструкции и ремонте сооружений для обеспечения безопасной эксплуатации промышленных и гражданских объектов.

*Судакова М.С., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г.* и др. Применение георадиолокации при комплексных геокриологических исследованиях // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 3. С. 69–82.

*Bertheliet J. J., Ney R., Ciarletti V., Reineix A.* et al. GPR, a ground-penetrating radar for the Netlander mission // J. Geoph. Res. 2003. Vol. 108, N 4. P. 5–18.

*Butnor J.R., Johnsen K.H. Lundmark T.* et al. Imaging tree roots with borehole radar // 11th Intern. Conf. on Ground Penetrating Radar, June 19–22, 2006, Columbus Ohio, USA. Columbus Ohio, 2006.

*De Pascale G.P., Pollard W.H., Williams K.K.* Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, North-West territories, Canada // J. Geophys. Res. Earth Surface (2003–2012). Vol. 113, Is. F2. June 2008. P. 1–15.

*Elsayed I.S., Alhussein A.B., Gad E., Mahfooz A.H.* Shallow seismic refraction, two-dimensional electrical resistivity imaging, and ground penetrating radar for imaging

the ancient monuments at the western shore of old Luxor city, Egypt // *Archaeol. Discovery*. 2014. N 2. P. 31–43.

*Farmani M.B., Keers H., Kitterød N.-O.* Time-lapse GPR tomography of unsaturated water flow in an ice–contact delta // *Vadose Zone J.* 2007. Vol. 6, N 4. P. 1–12.

*Fortier R., Savard C.* Engineering geophysical investigation of permafrost conditions underneath airfield embankments in Northern Quebec (Canada) // *Geo-2010. Confer. Proceed.* Calgary, 2010. P. 1307–1316.

*Hausmann H., Krainer K., Bruckl E., Mostler W.* Internal structure and ice content of Reichenkar rock glacier (Stubai Alps, Austria) assessed by geophysical investigations // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007. N 18. P. 351–367.

*Makino K.-I., Miura H.* Location of Mammoth remains in permafrost of Northern Siberia using GPR and multi-frequency EM // 18th EEGS Symp. on the Application of

Geophysics to Engineering and Environmental Problems. Extended abstr. 2005.

*Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z.* et al. Application of ground penetrating radar imagery for three-dimensional visualisation of near surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska // *Permafrost and periglacial processes*. 2007. Publ. online in Wiley InterScience (URL: [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)). DOI: 10.1002/ p.594.

*Tronicke J., Dietrich P., Wahlig U., Appel E.* Integrating surface georadar and crosshole radar tomography: A validation experiment in braided stream deposits // *Geophysics*. 2002. Vol. 67, N 5. P. 1516–1523.

*Wendrich A., Trela C., Krause M.* et al. Location of voids in masonry structures by using radar and ultrasonic traveltimes. Berlin: ECNDT, 2006.

Поступила в редакцию  
07.06.2017