

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОРАДАРНЫХ ПОДПОВЕРХНОСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА АРКТИКИ

*академик Н.Н. МЕЛЬНИКОВ, канд. техн. наук А.И. КАЛАШНИК,
вед. инж. Д.В. ЗАПОРОЖЕЦ, науч. сотр. А.Ю. ДЬЯКОВ,
мл. науч. сотр. Д.А. МАКСИМОВ*

*ФГБУН Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук,
г. Апатиты, e-mail: kalashnik@goi.kolasc.net.ru,*

В западной части российского сектора Арктики сосредоточено более 300 промышленных объектов, которые отнесены к категории особо ответственных и требуют регулярных обследований и мониторинга. Рассмотрен опыт и приведены примеры георадарных исследований Горного института КНЦ РАН на горных предприятиях, гидротехнических сооружениях, линейно протяженных объектах, котлованах и площадках для строительства, а также для идентификации и трассирования подземных инженерных коммуникаций.

Ключевые слова: Арктика, георадар, подповерхностные исследования, строение, состояние, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

В западной части российского сектора Арктики сосредоточено более 300 промышленных объектов, которые отнесены к категории особо ответственных (Доклад о состоянии..., 2014). Это рудники, карьеры и технические сооружения крупных горнодобывающих предприятий: АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «ОЛКОН», АО «Ловозерский ГОК», ГОК «Олений ручей» СЗФК, а также гидротехнические сооружения (ГТС) различного назначения: ГЭС, ТЭЦ, хвосто- и шламохранилища горно-перерабатывающих и металлургических предприятий. Сюда же следует отнести нефтегазообъекты (платформы, добычные приповерхностные и подводные модули, технологические и транспортные трубопроводы, временные хранилища, приемные и перевалочные прибрежные терминалы, заводы по переработке, магистральные транспортные нефтегазопроводы и т.п.), которые, в перспективе развития добычи нефти и газа на шельфе Баренцева моря и последующего трубопроводного транспортирования углеводородов потребителям, будут в значительной степени сконцентрированы в данном регионе (Мельников, Калашник, 2009; Супруненко, Сулова, 2012).

Наряду с суровыми арктическими условиями, геологическая среда западной части Арктики, особенно Кольского полуострова, является геодинамически активной — здесь инструментально регистрируются природно-техногенные опасные геомеханические процессы и геодинамические проявления различного масштаба (Годзиковская и др., 2010). В центральной части Кольского полуострова, вследствие

крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерском месторождениях, произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 4, приведшие к разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций. При этом область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район ведения горных работ.

ОСОБЕННОСТИ РЕГИОНА

Необходимо также выделить специфические для западной части российского сектора Арктики горно-геологические и индустриально-промышленные особенности:

- высокое напряженно-деформированное состояние массивов пород верхней части земной коры, с преобладанием субгоризонтальной тектонической составляющей, которая может превышать собственный вес пород в 2–3 раза (Геодинамическая безопасность..., 2003);

- гляциоизостатическое поднятие (всплывание) земной коры — при этом крупные геологические блоки по-разному и неравномерно смещаются по разломам (Никонов, 2006);

- сейсмичность как природного, так и техногенного характера, имеющая ярко выраженную зональность, приуроченную к прибрежным зонам и центральной части Кольского полуострова (Годзиковская и др., 2010);

- изменчивость рельефа земной поверхности с перепадом высот до 200–500 м (Калашник, Максимов, 2013);

- крупномасштабная и интенсивная разработка горнорудных месторождений подземным и открытым способом, с перемещением огромных объемов породных масс (Мельников, Лукичев, 2013);

- большое число озер и рек, имеющих социально-экономическое значение (источники водоснабжения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, ГЭС и т.п.) (Кашулин, Кашулина, 2014; Мельников, Калашник, 2009);

- наличие в регионе атомных объектов (Кольская атомная электростанция — работающие блоки и строительство второй очереди; хранилище отработавшего ядерного топлива в Сейда-губе; захоронение ядерных отходов в губе Андреевой и др.);

- наличие крупных морских портов: Мурманского, Кандалакшского и Витино;

- наличие ряда военных объектов стратегического и регионального значения.

Все это предопределяет, в целях обеспечения промышленной безопасности горнотехнических и нефтегазовых объектов региона, необходимость оценки их состояния и надежности выполнения функционального назначения на основе регулярных геотехнических исследований.

ВОЗМОЖНОСТИ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геотехнические исследования состояния промышленных объектов включают в себя, как правило, комплексы натуральных инженерно-геологических, геодезических и геофизических наблюдений (Калашник и др., 2015; Мельников и др. 2015), к числу которых следует отнести и георадарное подповерхностное зондирование. Георадарные исследования в комплексах натуральных наблюдений и инженерных изысканий начинают активно применяться в различных областях, среди которых в первую очередь необходимо выделить горное дело, геологию, транспортное, промышленное, гидротехническое и гражданское строительство, экологию и др. (Мельников, Калашник, 2010; Старовойтов, 2008). Отличительной особенностью георадарных зондирований

является возможность исследования внутренней структуры геологической среды или промышленной конструкции на глубину от 0,5 до 300 м с разрешающей способностью от 2 см до 5 м соответственно.

Для задач горного дела зондирование с помощью георадарных комплексов дает возможность: обследовать борта, уступы и бермы в карьерах; кровлю, потолочины и целики в подземных горных выработках; выявлять природные и техногенные разрывные нарушения в законтурном массиве пород; обследовать состояние ограждающих дамб накопителей жидких горнопромышленных отходов, котлованов и площадок под строительство, фундаментов под крупнотоннажные механизмы и сооружения и т.п.

Применение георадарных зондирований в геологии позволяет строить детальные геологические разрезы как при инженерно-геологических изысканиях, так и при оконтуривании залежей полезных ископаемых; определять границы распространения полезных ископаемых, положение карстовых воронок и пустот; выявлять локальные проявления месторождений полезных ископаемых; определять положение уровня грунтовых вод, глубину и профиль дна рек и озер; толщину льда, глубину промерзания водоемов.

С применением современных георадарных технологий возможно производить оценку состояния оснований и фундаментов транспортных, промышленных и гражданских сооружений; определять глубину промерзания в грунтовых массивах и дорожных конструкциях; определять содержание влаги в грунте земляного полотна и подстилающих грунтовых основаниях; определять качество и состояние бетонных конструкций (мостов, зданий и т.д.), состояние дамб и плотин; выявлять оползневые зоны.

Георадар является очень хорошим средством для уточнения и идентификации подземных инженерных сетей и коммуникаций: металлических и пластиковых труб, кабелей, объектов коммунального хозяйства, включая водо- и теплоснабжение (особенно для случаев отсутствия или утраты документации на них).

Специально следует выделить решаемые с помощью георадарных технологий задачи экологии: поиск и оконтуривание подземных источников воды, оценка загрязнения почв; обнаружение утечки из нефте-, продукто- и водопроводов; идентификация мест захоронения экологически опасных отходов и др.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРНОГО ИНСТИТУТА КНЦ РАН

Горным институтом КНЦ РАН выполнены георадарные поверхностные исследования на основных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова и о. Шпицберген, на площадках строительства новых промышленных объектов, на участках трассы планируемых магистральных трубопроводов по Кольскому полуострову и Северной Карелии, а также фундаментов телебашни г. Мурманска высотой 186 м, опор для трубопровода теплоцентрали, фундаментов под крупнотоннажные дробильные мельницы обогатительных фабрик горно-перерабатывающих предприятий (рис. 1, табл. 1). Ниже приведены примеры проведенных георадарных подповерхностных исследований.

На карьере «Железный» АО «Ковдорский ГОК» георадарные зондирования выполнены в целях оценки состояния и исследования внутренней структуры массива пород рабочих уступов, а также для выявления и геометризации пространственного положения плоскостей тектонических нарушений, геологических дислокаций и зон неоднородностей и структурной нарушенности (Калашник и др., 2014) (рис. 2).

Выполнено также георадарное обследование предгорья Ковдорского горнорудного массива, представляющего собой природно-техническую систему, подвергающуюся



Рис. 1. Схема основных промышленных предприятий Кольского полуострова и Северной Карелии.

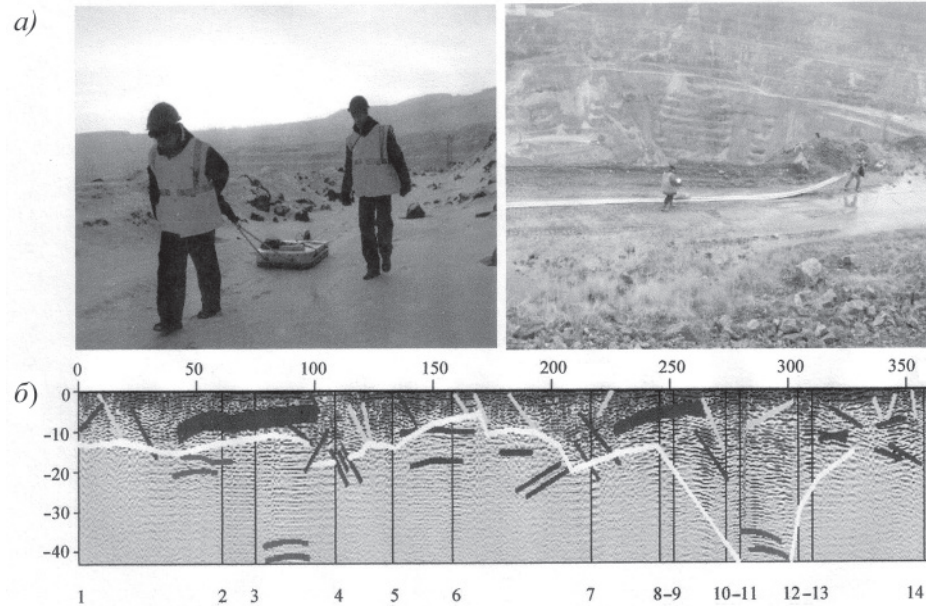


Рис. 2. Георадарные обследования участка борта карьера Железный АО «Ковдорский ГОК»: *а* — проведение измерений; *б* — пример геологического разреза по данным георадарного зондирования.

Таблица 1

**Примеры георадарных подповерхностных исследований в западной части
российского сектора Арктики**

Наименование объекта исследования	Цель и задачи исследований
Горнодобывающие предприятия	
Ковдорский ГОК, карьер «Железный», рабочие уступы	Оценка геолого-структурного строения законтурного массива пород; выявление дислокаций и зон неоднородностей — для обоснования параметров новых уступов
Ковдорский ГОК, карьер «Железный», участки ЦПТ и РДКК	Оценка состояния и структуры законтурного массива пород; выявление и трассирование тектонических нарушений; выявление дислокаций и зон с различными волновыми характеристиками — для целей оценки устойчивости участка
АО «Апатит», рудник Центральный, отвалы	Оценка структуры отвалов с выявлением уплотненных породно-снежно-ледяных зон — для решения задач их перемещения за пределы действующего карьера
АО «Апатит», рудник Восточный, карьеры Коашвинский, Ньюкпахкский	Выявление границ изменения литологической разности пород и руд
АО «Апатит», рудник Кировский, АО «Апатит», рудник Расвумчорский	Обследование законтурного состояния стенок горной выработки без крепи и с крепью
Гидротехнические сооружения	
СЗФК, ограждающие дамбы хвостохранилища	Мониторинг состояния и выявление скрытых фильтрационно-деформационных процессов — для минимизации рисков потери противофильтрационной функциональности и механической устойчивости ограждающих дамб
Кольская ГМК, ограждающие дамбы хвостохранилища	
Нивские ГЭС, Пиренгская плотина Кривопорожская ГЭС, Кемская плотина	Определение положения депрессионной плоскости, выявление скрытых зон неоднородностей (разуплотнения) в теле плотины
Фундаменты	
СЗФК, фундаменты мельниц обоганительной фабрики	Определение качества заливки, состояния и структуры фундаментов, а также оценка влагонасыщенности пород под ними
г. Мурманск, фундаменты телебашни	Оценка прочности, состояния и структуры четырех фундаментов телебашни
ОАО «Арктиуголь», ТЭЦ п. Баренцбург, Шпицберген	Изучение состояния приповерхностных грунтов в районе расположения ТЭЦ п. Баренцбург, определение верхней границы зоны вечной мерзлоты
Площадки под строительство	
ЗАО «МурманскТИСИЗ», разгрузочная площадка на ст. Титан	Определение структуры насыпных и естественных грунтов разгрузочной площадки. Уточнение и дополнение геологических разрезов
СЗФК, площадка строительства хвостохранилища	Оценка качества выторфовки; выявление влагонасыщенных и водоносных слоев в подстилающих породах; оконтуривание сформировавшейся при выемке естественного грунта рельефа поверхности под телом дамбы
г. Мурманск, Долина уюта, котлован для строительства спортивного комплекса	

Наименование объекта исследования	Цель и задачи исследований
Линейно-протяженные объекты	
ЗАО «МурманскТИСИЗ» ж.д. пути на ст. Титан.	Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна ж.д. путей
Дорога на новый аэропорт «Хибины»	Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна дороги
Участки трассы магистрального трубопровода в Кандалакшской сейсмогенной зоне	Исследование состояния и структуры приповерхностной зоны земной коры на активных разломах; оценка изменчивости волновых характеристик по мере удаления от разлома
Озеро Имандра, переходная зона «суша–вода» для магистрального трубопровода	Оценка толщины льда и состояния флюидонасыщенного слоистого массива грунтов
Склон горы Айкуайвенчор, горнолыжный подъемник	Оценка мощности моренных отложений для целей строительства
Коммуникации	
г. Апатиты, Академгородок КНЦ РАН	Поиск и картирование подземных инженерных сетей и коммуникаций.
г. Апатиты, центральный городской стадион	Обследование грунта Апатитского стадиона для сооружения дренажа искусственного покрытия

периодическим взрывным (волновым) воздействиям. Анализ волновых картин на радарограммах, полученных при проведении исследований, подтвердил возможность применения методов неразрушающего подповерхностного зондирования в подобных условиях с достаточной достоверностью получения данных и их количественной и качественной интерпретации. Выявлен скрытый в глубине массива и представляющий потенциальную опасность для промышленных сооружений разлом. Также было установлено, что перекрывающий разлом слой мощностью до 5 м представляет собой сильнотрещиноватые раздробленные породы.

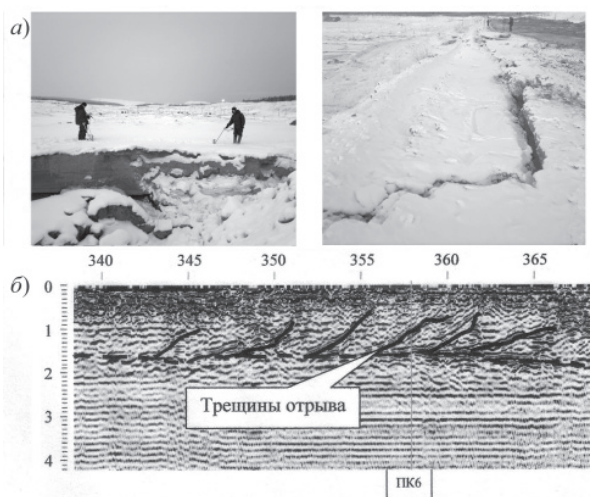


Рис. 3. Обследование участка ограждающей дамбы хвостохранилища георадарными комплексами: а — трещины в теле дамбы; б — продольное сечение по данным георадарного зондирования.

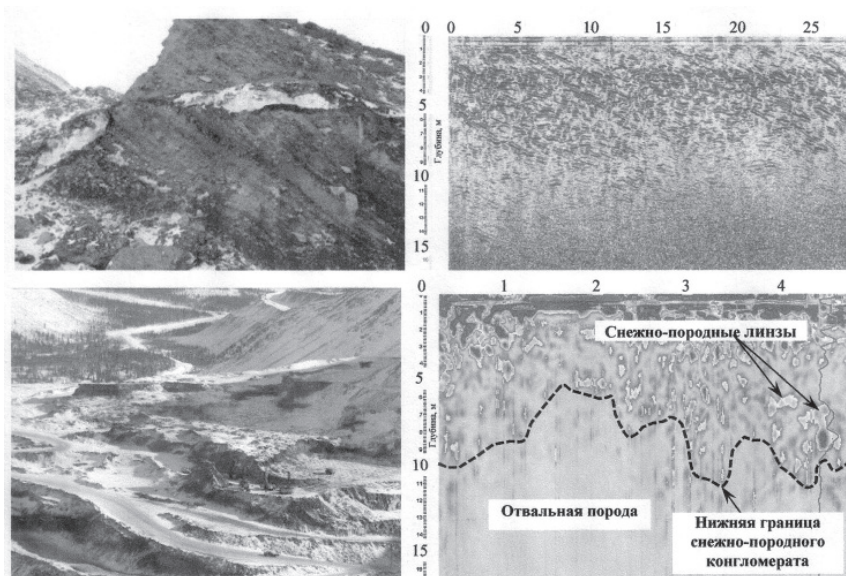


Рис. 4. Фрагмент отвалов пород с включением снежно-ледяной зоны (слева) и фрагменты разрезов по данным георадарных исследований (справа).

В течение ряда лет выполнялся мониторинг состояния ограждающих дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» (Данилкин и др., 2014), хвостохранищ АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей» СЗФК (Калашник и др., 2013) в целях минимизации рисков фильтрационно-деформационных процессов.

На АО «Апатит» выполнена оценка внутренней структуры породных отвалов карьера «Центральный» в целях выявления уплотненных породно-снежно-ледяных зон (линз) (рис. 4), а перспективный участок рудника «Восточный» дифференцирован по литологической разности пород и руд.

На западном склоне горы Айкуайвенчорр Хибинского горнорудного массива (центральная часть Кольского полуострова) протяженностью 515 м и с перепадом высот от вершины до нижней точки склона приблизительно 300 м георадарное зондирование было выполнено в комплексе изысканий для строительства лыжного подъемника. Исследованный участок имел снежный покров с повышенной влажностью и локальными обнажениями склона. Глубина снега составляла в среднем 80–90 см, а на отдельных участках достигала 1,5 м. По результатам камеральной обработки полевых исследований построена радарограмма (рис. 5), на которой можно выделить несколько слоев. Снежный покров четко прослеживается по длине всего профиля ввиду большой разницы диэлектрической проницаемости на границе сред «снег–морена». На участках 0–55 м, 85–160 м, 220–230 м, 305–315 м снежный покров отсутствует. Вторым слоем была выделена морена, мощность которой составляет от 2 м на вершине горы до 5 м к подножью. При анализе профиля на участке 0–270 м можно увидеть увеличение мощности морены с 2 до 5 м, а на участке 270–515 м — уменьшение с 5 до 3,5 м. Граница морены с коренной породой менее уверенно идентифицируется ввиду суглинистых отложений в составе верхнего слоя и повышенной влажности исследуемой области, обусловленной активным таянием снега.

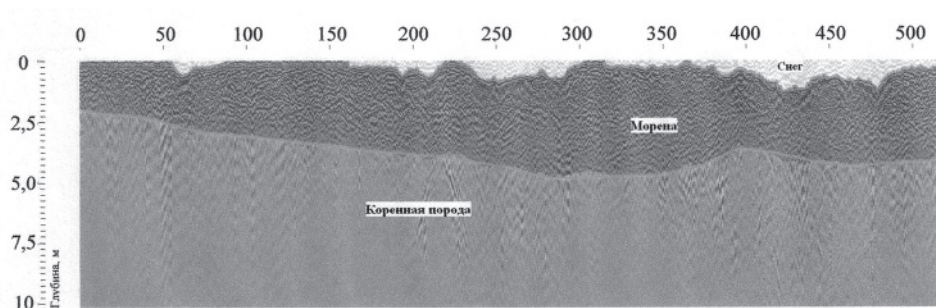


Рис. 5. Геологический разрез, построенный по результатам георадарного зондирования склона горы Айкуайвенчорр Хибинского горнорудного массива.

При строительстве ограждающих дамб хвостохранилища ГОКа «Олений ручей» СЗФК была выполнена оценка качества «выторфовки» грунтов площадки под строительство и исследовано подстилающее основание на наличие скрытых влагонасыщенных и водоносных слоев. В дальнейшем был выполнен мониторинг вывода гидротехнической системы «хвостохранилище–дамбы» на рабочий режим. Также было выполнено георадарное обследование состояния бетонных фундаментов, построенных для дробильных мельниц (рис. 6).

В зимний период было выполнено георадарное зондирование донных грунтов в переходной зоне «береговой склон–крупномасштабный водоем» (измерения производились с поверхности ледяного покрова озера Имандра, центральная часть Кольского полуострова). При этом во внимание принимались три группы основных задач: 1) геологические (уточнение литологии и структуры геологического разреза переходной зоны); 2) гидрологические (глубина воды, мощность придонных осадков, грунтов, илов; толщина льда), 3) поисковые (связанные с обнаружением и идентификацией искусственных (техногенных) объектов на дне водоемов, в осадочных слоях, илах и ледовом покрове).

Анализ полученных результатов позволяет выявить следующие особенности исследуемого водного объекта: толщина ледового покрова составляет около 1,5 м; на границе илистых отложений с водой отмечается резкая смена волновой картины, что дает возможность четко определить глубину водоема на исследованном участке,

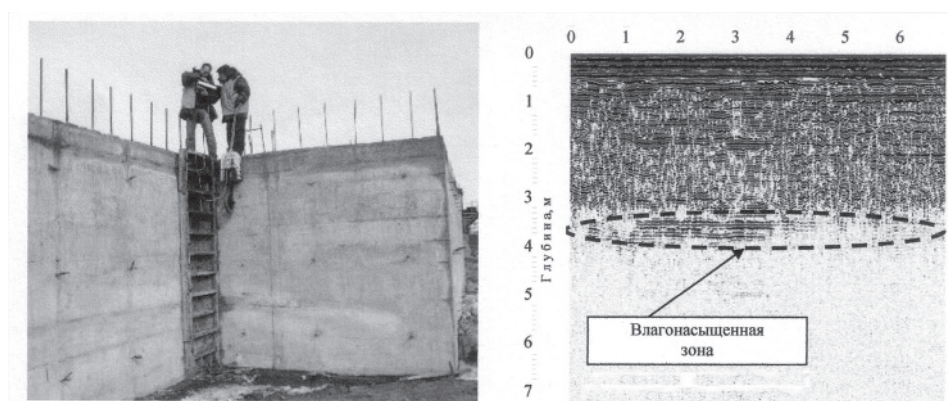


Рис. 6. Георадарное зондирование по стенкам и кровле бетонных фундаментов под мельницы.

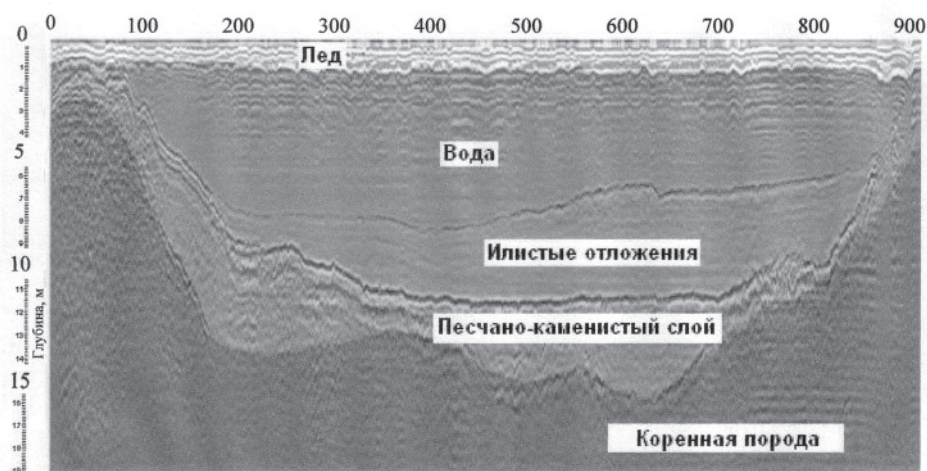


Рис. 7. Радарограмма исследований в переходной зоне «береговой склон – крупномасштабный водоем» (оз. Имандра).

которая составляет порядка 6–8 м; подошва илов идентифицирована по интенсивным осям синфазности более сложной формы по сравнению с донным отражением и поэтому уверенно выделяется; коренные отложения отличаются от современных илов на радарограмме характером осей синфазности; глубина залегания коренных пород составляет от 2–3 м у берега до 14–16 м при удалении от береговой черты (рис. 7).

Отдельно следует упомянуть георадарное зондирование площадки здания ТЭЦ ОАО «Арктикуголь» в пос. Баренцбург (о. Шпицберген). Целью работ являлось выявление глубины залегания верхней границы мерзлоты, которая, по данным инженерно-геологических изысканий 25-летней давности, располагалась на уровне 6,2–6,7 м ниже дневной поверхности. Георадарным определением было установлено, что граница мерзлоты в настоящее время расположена на глубине 6,5–7,5 м на различных участках периметра здания.

В целом за период 2009–2014 гг., в целях решения различных горно-геологических и геотехнических задач, георадарные исследования были выполнены на более чем 20 объектах, среди которых, с учетом вышеперечисленных горнотехнических, фундаменты телебашни г. Мурманска, котлованы и площадки для строительства, лыжный и городской стадионы, дороги и др. (см. табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт проведения работ и полученные результаты позволяют уверенно констатировать, что георадарное подповерхностное зондирование, обладающее такими качествами, как оперативность и информативность, может являться эффективным дополнением (а в отдельных случаях — самостоятельным средством) инженерных исследований и мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов для условий западной части российского сектора Арктики.

Георадарные подповерхностные исследования, выполненные Горным институтом КНЦ РАН для разнопрофильных промышленных объектов Кольского полуострова, Северной Карелии и о. Шпицберген, наглядно демонстрируют, что георадарные технологии могут быть отнесены к универсальным средствам неразрушающего изучения

внутреннего строения и мониторинга состояния ответственных объектов в арктических условиях. Институтом создается система многоуровневого геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов региона, в основу которой положен принцип проведения системных мультидисциплинарных комплексных исследований, включающих в себя: наземные и GPS (спутниковые) геодезические, инженерно-геологические, гидрогеологические и геотехнические измерения, а также подповерхностную, поверхностную и площадную (спутниковую) георадарную съемку. Интегрирование георадарных съемок в геодезическую систему наблюдений позволит достаточно уверенно и с высокой точностью определять смещения и деформации дневной поверхности и контролируемых объектов. Совместное использование геодезических и георадарных методов в комплексе с инженерно-геологическими, гидрогеологическими и геомеханическими исследованиями позволит получать более полную картину состояния геологической среды, сопряженной с контролируруемыми объектами, с учетом тектонических и гидрогеологических процессов.

Статья подготовлена в рамках выполнения проекта РФФИ 15-29-06037.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Геодинамическая безопасность при освоении недр земной поверхности / Отв. ред. А.А. Козырев. Апатиты: КНЦ РАН, 2003. 207 с.

Годзиковская А.А., Асминг В.Э., Виноградов Ю.А. Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающей территории в XX веке / Отв. ред. А.Н. Виноградов. М.: Ваш полиграфический партнер, 2010. 130 с.

Данилкин А.А., Калашиник А.И., Запорожец Д.В., Максимов Д.А. Мониторинг состояния ограждающей дамбы в зоне отработки техногенного месторождения Ковдорского ГОКа // ГИАБ. 2014. № 7. С. 344–352.

Доклад о состоянии и об охране окружающей среды Мурманской области в 2013 году. 2014. 152 с. URL: <http://new.gov-murman.ru/region/environmentstate/2013.pdf> [дата обращения 23.06.2015]

Калашиник А.И., Гилярова А.А., Калашиник Н.А., Максимов Д.А., Смирнова О.В. Экономические аспекты исследований состояния гидротехнического сооружения (ГТС) накопителя жидких промышленных отходов // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. 2015. № 6. С. 23–26.

Калашиник А.И., Запорожец Д.В., Дьяков А.Ю., Казачков С.В., Сохарев В.А. Исследования георадарами структуры и текущего состояния горных пород, слагающих уступы основного карьера Ковдорского ГОКа // Горный журнал. 2014. № 4. С. 60–64.

Калашиник А.И., Запорожец Д.В., Лебедик А.В. Мониторинг строительства и эксплуатации ограждающих дамб хвостохранилища ГОК «Олений ручей» // Мониторинг природных и техногенных процессов при ведении горных работ: Сб. докл. Всеросс. науч.-техн. конф. с междунар. участием, 24–27 сентября 2013 г. Апатиты, 2013. С. 188–193.

Калашиник А.И., Максимов Д.А. Автоматизация геостатистической обработки данных при проведении факторного анализа трасс линейно-протяженных объектов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 8. С. 19–21.

Кашулин Н.А., Кашулина Т.Г. Современное состояние пресноводных ресурсов Мурманской области. Проблемы и перспективы // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: Материалы V Всерос. науч. конф. с междунар. участием. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2014. Ч. 1. С. 21–26.

Мельников Н.Н., Калашиник А.И. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // Вестник КНЦ. 2010. № 3. С. 4–8.

Мельников Н.Н., Калашиник А.И., Каспарьян Э.В., Калашиник Н.А. Концепция геодинамического мониторинга объектов нефтегазопромысла в регионе Баренцева моря // Геоэкология. 2015. № 2. С. 166–175.

Мельников Н.Н., Калашиник А.И. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2009. 140 с.

Мельников Н.Н., Лукичев С.В. Современные тенденции развития горной технологии, региональные особенности // Горнодобывающая промышленность Баренцева Евро-Арктического региона: взгляд в будущее: Сб. докл. II Междунар. конф. горнопромышленного комплекса, Кировск, 22–23 ноября 2012 г. Мурманск: Северная ТПП, 2013. С. 6–10.

Никонов А.А. Современные движения земной коры. Изд. 2-е, доп. М.: КомКнига, 2006. 192 с.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: МГУ, 2008. 192 с.

Супруненко О.И., Сулова В.В. Западно-Арктическая нефтегазоносная провинция: ресурсная база углеводородного сырья, состояние и перспективы недропользования // Горный журнал. 2012. № 3. С. 66–71.

N.N. MELNIKOV, A.I. KALASHNIK, D.V. ZAPOROZHETS, A.YU. DYAKOV, D.A. MAKSIMOV

EXPERIENCE IN APPLYING GEORADAR SUBSURFACE STUDIES AT THE RUSSIAN ARCTIC WESTERN SECTOR

The western part of the Russian Arctic sector accumulates more than 300 industrial objects which are considered as critical and require regular observations and monitoring. The paper observes experience and presents cases of georadar studies performed by the Mining Institute KSC RAS on mining enterprises, hydrotechnical facilities, linear extended objects, ditches and construction sites, as well as for identifying and tracing underground engineering communications.

Keywords: Arctic, georadar, subsurface studies, structure, state, monitoring.