



# Георадарные обследования горнотехнических сооружений западной части Арктики

А.И. Калашник✉, А.Ю. Дьяков

Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация  
✉ a.kalashnik@ksc.ru

**Резюме:** Описано применение георадарных обследований как неразрушающего, дающего детализированную сплошную (профильную) картину метода исследования внутренней структуры и водонасыщенности горнотехнических сооружений. Приведены примеры обследований конкретных объектов крупных горнодобывающих предприятий западной части Арктики. Показано, что наведенное георадаром электромагнитное поле искажается на участках различия физических свойств скальных пород и грунтов (неоднородности, повышенная трещиноватость, тектонические нарушения, разломы, зоны повышенного водонасыщения и т. п.). Определен ключевой параметр георадарного зондирования, которым является интенсивность искажения волнового поля, определяемая контрастностью (соотношением) физических свойств пород, пространственной ориентацией и глубиной расположения неоднородности. На основе этого выявлены особенности строения скальных пород карьера Железный АО «Ковдорский ГОК», рудника Восточный КФ АО «Апатит» и др. Выявлены и трассированы скрытые тектонические разломы и неоднородности массива, представляющие потенциальную опасность для горных работ и промышленных сооружений. На основе многолетних мониторинговых георадарных обследований ограждающих дамб хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей» СЗФК, АО «ОЛКОН» установлены закономерности формирования фильтрационно-деформационных процессов. Для ГОК «Олений ручей» выполнены оценки качества сооружения ограждающих дамб хвостохранилища, бетонных фундаментов для мельниц, железнодорожных погрузо-разгрузочных терминалов. На острове Шпицберген георадарными обследованиями уточнена верхняя граница мерзлых пород под площадкой ТЭЦ АО «Арктикуголь».

**Ключевые слова:** горнотехнические сооружения, неоднородность структуры, водонасыщенность, георадарное обследование, физические свойства, фильтрационно-деформационные процессы, промышленная безопасность, Арктика

**Для цитирования:** Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Георадарные обследования горнотехнических сооружений западной части Арктики. *Горная промышленность*. 2023;(S1):103–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-103-109>

## Georadar surveys of mining structures in the western part of the Arctic

A.I. Kalashnik✉, A.Y. Dyakov

Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation  
✉ a.kalashnik@ksc.ru

**Abstract:** The application of georadar surveys is described as a non-destructive, giving a detailed continuous (profile) picture, method for studying the internal structure and water saturation of mining structures. Examples of surveys of specific objects of large mining enterprises in the western part of the Arctic are given. It is shown that the electromagnetic field induced by the georadar is distorted in areas where the physical properties of rocks and soils differ (heterogeneities, increased fracturing, tectonic disturbances, faults, zones of increased water saturation, etc.). The key parameter of georadar sounding is determined, which is the intensity of wave field distortion, determined by the contrast (ratio) of the physical properties of rocks, spatial orientation and depth of heterogeneity. Based on this, structural features of the rocks of the Zhelezny quarry JSC “Kovdorsky GOK”, the mine Vostochny KF of JSC «Apatit», etc. were revealed. Hidden tectonic faults and heterogeneities of the massif, which pose a potential danger to mining operations and industrial facilities, were identified and traced. On the basis of long-term monitoring georadar surveys of the enclosing dams of the tailings of Kovdorsky GOK JSC, Kola Mining and Metallurgical Plant JSC, Oleniy Ruchey Mining and Processing Complex of NWPC, OLCON JSC, patterns of formation of filtration-deformation processes were established. For the Oleniy Ruchey mine, quality assessments were made for the construction of tailings dams, concrete foundations for mills, and railway loading and unloading terminals. On the island of Svalbard, georadar surveys have clarified the upper boundary of frozen rocks under the site of the thermal power plant of Arktikugol JSC.

**Keywords:** mining structures, heterogeneity of structure, water saturation, georadar survey, physical properties, filtration-deformation processes, industrial safety, Arctic

**For citation:** Kalashnik A.I., Dyakov A.Y. Georadar surveys of mining structures in the western part of the Arctic. *Russian Mining Industry*. 2023;(1 Suppl.):103–109. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-103-109>



## Введение

В западной части Арктики, на территории Евроарктического Баренц-региона сосредоточено значительное число горнотехнических сооружений, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой минерального рудного сырья, большая часть которых попадает в категорию особо ответственных объектов. К ним относятся рудники, карьеры, фабрики, дороги, объекты складирования минеральных отходов горного производства, гидротехнические сооружения различного назначения, приемные и перевалочные транспортные терминалы, другие объекты и сооружения. В различных сочетаниях они входят в организационные структуры крупных горнодобывающих предприятий Кольского полуострова: АО «Кольская ГМК», АО «ОЛКОН», ООО «Ловозерский ГОК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей» СЗФК, АО «Ковдорский ГОК».

Евроарктический регион находится в суровых арктических условиях: протяженный до 6 мес зимний период с соответствующим снежным покровом до 1 м и выше; полярная ночь длительностью более 1 мес, частые снегопады и метели при коротком (2–3 мес) и дождливым теплом времени года. Это предопределяет не только дискомфортные условия для населения и урбанизированных территорий, но и повышенные требования к обеспечению промышленной и экологической безопасности горнотехнических сооружений и объектов.

Кроме того, горно-геологическая среда (приповерхностная часть земной коры) западной части Арктики, и особенно Кольского полуострова, является геодинамически активной – здесь постоянно формируются различные геомеханические и гидрогеомеханические процессы, вследствие чего происходят геодинамические проявления различного масштаба [1]. В центральной части Кольского полуострова вследствие крупномасштабных горных работ на Хибинских и Ловозерских месторождениях произошли индуцированные землетрясения магнитудой свыше 4, приведшие к катастрофическим разрушениям как подземных горных выработок, так и наземных сооружений и коммуникаций. При этом область воздействия землетрясений в десятки раз превышала район ведения горнодобывающих работ.

К специфическим для западной части Арктики следует отнести также следующие горно-геологические и индустриально-промышленные особенности:

- сейсмичность как природного, так и техногенного характера, имеющая ярко выраженную зональность, приуроченную к прибрежным зонам и центральной части Кольского полуострова [1];

- изменчивость рельефа земной поверхности в окрестности объектов и сооружений горнодобывающих предприятий с перепадом высот до 200–500 м [2];

- крупномасштабная и интенсивная разработка месторождений рудных полезных ископаемых на горных территориях с выемкой, перемещением и отвалообразованием огромных объемов породных масс на ограниченных участках склонов сопков, гор, котлованов, водоемов [3];

- большое число сопряженных с горнотехническими сооружениями и объектами природных озер и рек, имеющих социально-экономическое значение (источники водоснабжения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий, ГЭС и т.п.) [2];

- наличие крупных приемо-перевалочных терминалов продукции горного производства в морских портах: Мурманском, Кандалакшском и Витино;

- все горнодобывающие предприятия западной части

Арктики являются градообразующими, при этом города и населенные пункты находятся в непосредственной близости и в зоне влияния горных разработок.

## Методы и подходы

Все это предопределяет в целях обеспечения промышленной и экологической безопасности горнотехнических сооружений и объектов региона необходимость оценки их состояния и надежности выполнения функционального назначения на основе регулярных геотехнических исследований и контроля их состояния. Эти исследования, как правило, включают в себя комплексы натуральных инженерно-геологических, геодезических и геофизических наблюдений [2], к числу которых следует отнести и георадарное подповерхностное зондирование [4–13]. Поэтому георадарные исследования активно используются Горным институтом КНЦ РАН на всех крупных горнодобывающих предприятиях Кольского полуострова [2; 14; 15] (рис. 1).

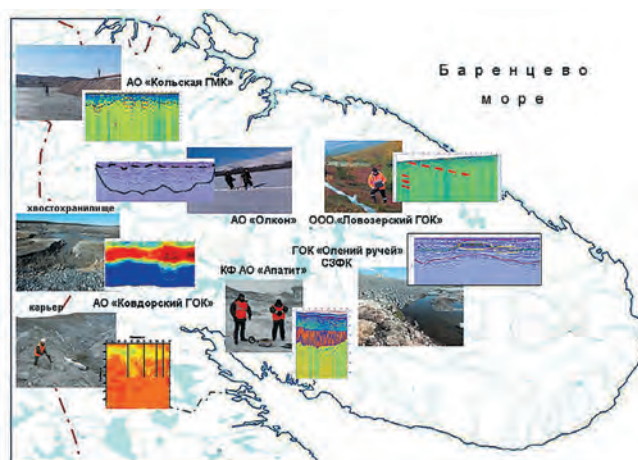


Рис. 1  
Георадарные исследования объектов горнодобывающих предприятий Кольского полуострова

Fig. 1  
Georadar research of objects of mining enterprises of the Kola Peninsula

Исследования выполняются тремя георадарными комплексами: Ramac GPR/ХЗМ (производства компании Mala Geo Science, Швеция), «ЛОЗА-1В» и «ЛОЗА-1Н» (производства ООО «ВНИИСМИ», Россия).

Георадарный комплекс Ramac GPR/ХЗМ включает в себя: блок управления ХЗМ, три экранированные антенны, внешний водо- и пылезащищенный ноутбук и модуль управления и визуализации (монитор Ramac XV10), который обрабатывает принятый сигнал и отображает полученные данные на дисплее в реальном времени. Экранированный тип антенн отличается тем, что большая часть энергии излучается только в нижнюю полусферу пространства, в зондируемый объект. Диапазон рабочих глубин составляет от 0 до 40 м при разрешающей способности 0,05–0,25 м.

Георадары «ЛОЗА-1В» и «ЛОЗА-1Н» представляют собой переносные комплексы, состоящие из функциональных частей: блок управления и индикации; блок формирования зондирующих импульсов; блок регистрации; передающая и приемная антенны. В зависимости от решаемых задач применялись антенны различной длины, с центральными частотами в диапазоне: 50–300 МГц – «ЛОЗА-1В», 10 МГц – «ЛОЗА-1Н», и разной степенью демпфирования. Диапазон рабочих глубин для «ЛОЗА-1В» составляет от 0 до 50 м при разрешающей способности 0,05–0,2 м, для «ЛОЗА-1Н»: от 0 до 200 м, и 1,5 м соответственно [14].



Следует отметить, что для горнотехнических сооружений реальные показатели могут отличаться до 30–40% от указанных технических, в зависимости от разновидностей зондируемых пород и грунтов, их водонасыщенности и природно-технических условий эксплуатации сооружения.

### Результаты и обсуждение

С использованием георадарных обследований получены данные о внутренней структуре, механическом состоянии и водонасыщенности пород и грунтов для более чем 20 различного рода объектов всех крупных горнодобывающих предприятий региона (табл. 1), а также для АО «Арктикуголь» (о. Шпицберген). Ниже приведены отдельные примеры георадарных подповерхностных исследований и полученных результатов.

Георадарные обследования объектов АО «Ковдорский ГОК» выполняются с 2012 г. На карьере Железный АО «Ковдорский ГОК» измерения 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, зон неоднородностей и структурной нарушенности [2; 15] (рис. 2).

На рабочем участке карьера Железный АО «Ковдорский ГОК» выполнено георадарное зондирование уступа в целях уточнения внутренней структуры и водонасыщенности



**Рис. 2**  
Георадарные обследования участка борта карьера Железный АО «Ковдорский ГОК» с использованием георадарных комплексов:  
а – Ramac GPR/X3M;  
б – «ЛОЗА 1-Н»

**Fig. 2**  
Georadar examinations of the side of the side of the Zhelezny quarry JSC «Kovdorsky GOK» using georadar complexes:  
a – Ramac GPR/X3M;  
b – «Loza 1-N»

пород. На обследуемом участке визуальным обследованием и фотосъемкой обнажения уступа был зафиксирован выход тектонического нарушения пород на обнажении откоса уступа (рис. 3, а).

Анализ волновой радарограммы, полученной методом профилирования на постоянной базе (см. рис. 3, б), показал, что в интервале георадарного профиля 100–200 м и глубине 15 м от поверхности фиксируется большое количество

**Таблица 1**

Применение георадарных исследований горнотехнических объектов западной части Арктики

**Table 1**

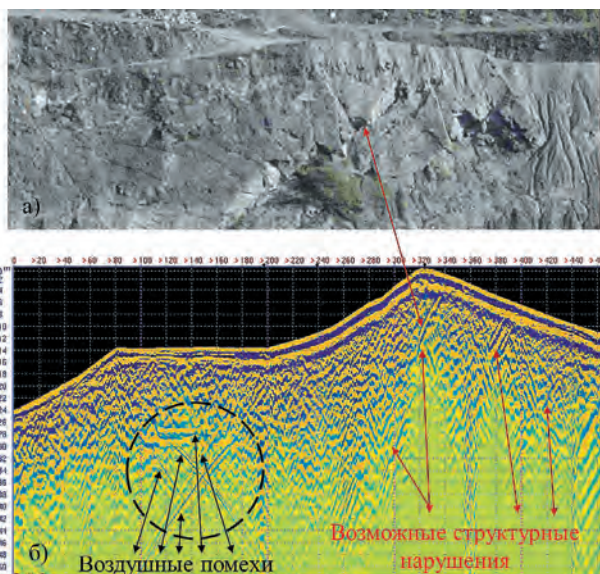
Application of georadar research of the mining objects of the western part of the Arctic

| Горнотехнические объекты. Горнодобывающие предприятия   | Цель и задачи георадарных исследований   |
|---|--|
| Карьеры, горнотехнические сооружения, породные отвалы, хвостохранилища КФ АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК»  | Оценка геолого-структурного строения законтурного массива пород; выявление дислокаций и зон неоднородностей – для обоснования параметров новых уступов   |
|   | Оценка состояния и структуры законтурного массива пород; выявление и трассирование тектонических нарушений; выявление дислокаций и зон с различными физическими характеристиками – для целей оценки устойчивости обнажений пород в карьерах                    |
|   | Выявление зон повышенной водонасыщенности скальных пород   |
|   | Выявление границ изменения литологической разности пород и руд   |
|   | Обследование законтурного состояния стенок подземной горной выработки, без крепи и с крепью  |
| Горнотехнические водоемы, ограждающие и водорегулирующие сооружения АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей» СЗФК, АО «ОЛКОН» | Оценка структуры отвалов с выявлением уплотненных породно-снежно-ледяных зон – для решения задач их перемещения за пределы действующего карьера. Обследование внутренней структуры и состояния породных отвалов на горных склонах                              |
|   | Мониторинг состояния и выявление скрытых фильтрационно-деформационных процессов – для минимизации рисков потери противофильтрационной функциональности и механической устойчивости ограждающих и водорегулирующих сооружений                                   |
| Фундаменты и опоры горнотехнических сооружений ГОК «Олений ручей» СЗФК, АО «Арктикуголь»  | Определение положения депрессионной плоскости, выявление скрытых фильтрационно-деформационных зон в теле водорегулирующего сооружения – с целью выяснения причины повышенной протечки и для выработки рекомендаций по управлению фильтрационной проницаемостью |
|   | Определение качества бетонной заливки, состояния и структуры фундаментов, а также оценка влагонасыщенности пород под ними  |
|   | Оценка прочности, состояния и структуры фундаментов и опор   |
| Площадки, котлованы, инженерно-геологические изыскания на территории горного отвода ГОК «Олений ручей» СЗФК, ООО «Ловозерский ГОК»                              | Изучение состояния приповерхностных грунтов в районе расположения горнотехнических сооружений, определение верхней границы зоны вечной мерзлоты  |
|   | Определение структуры насыпных и естественных грунтов разгрузочной площадки железнодорожных складов. Уточнение и дополнение геологических разрезов   |
|   | Оценка качества выторфовки; выявление влагонасыщенных и водоносных слоев в подстилающих породах; оконтуривание сформировавшейся при выемке естественного грунта контура поверхности  |
|   | Оценка мощности моренных отложений для целей строительства горнотехнического сооружения. Обследование устойчивости горных откосов при врезке дорожного полотна   |





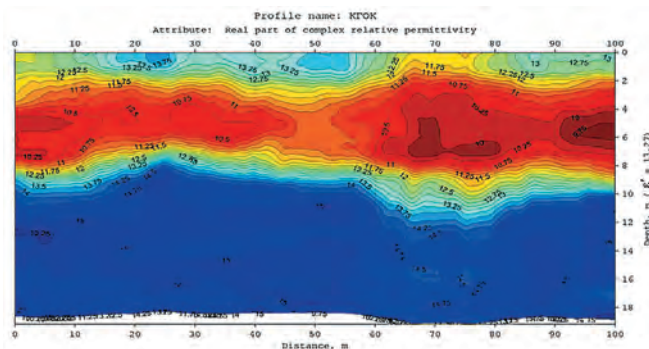
|  |   |
|--|---|
| Железнодорожные пути, автомобильные дороги, трассы продуктопроводов ФГУП «Атомфлот», ГОК «Олений ручей» СЗФК, КФ АО «Апатит» | Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна железнодорожных путей   |
|  | Определение структуры насыпных и естественных грунтов полотна дороги  |
|  | Исследование состояния и структуры приповерхностной зоны земной коры на активных тектонических разломах; оценка изменчивости физических характеристик по мере удаления от разлома |
|  | Оценка мощности промерзания и состояния водонасыщенного слоистого массива грунтов   |
| Близповерхностные инженерные коммуникации АО «Ковдорский ГОК», КФ АО «Апатит», АО «Кольская ГМК»                             | Поиск и картирование подземных инженерных сетей и коммуникаций  |
|  | Обследование пород и грунтов для сооружения искусственного дренажа  |
| Береговые приемные и перегрузочные терминалы ФГУП «Атомфлот»   | Обследование состояния береговых скально-породных сооружений  |



**Рис. 3**  
Комплексное обследование уступа карьера: а – визуальное обследование и фотосъёмка; б – интерпретированная радарограмма участка обследования

**Fig. 3**  
Comprehensive survey of the quarry ledge: (a) visual inspection and photography; (b) interpreted radarogram of the survey site

гиперболических отражений, которые приурочены к находящимся на поверхности техническим конструкциям. Вычисленные скорости  $V$  по теоретически рассчитанной гиперболе имеют значения в интервале 11–13,8 см/нс, что позволяет интерпретировать отражения как воздушные помехи. В правой части профиля, на отметках 340, 400 и 440 м, предположительно прослеживаются структурные нарушения массива пород. Это подтверждается тем, что значения скорости электромагнитного сигнала, рассчитанные по теоретической гиперболе, лежат в интервале 5,6–9,13 см/нс. Такие значения свидетельствуют, что данные отражения получены от структурных неоднородностей, находящихся в массиве скальных пород. Дальнейшие локализация и трассирование структурных нарушений производились путем анализа волновой картины и сопоставления осей синфазности электромагнитных сигналов. Интерпретированные данные на фрагменте радарограммы 300–340 м (рис. 3, б) совпадают с визуальным обследованием уступа (см. рис. 3, а), где четко наблюдается структурное нарушение. Использование общего среднего значения диэлектрической проницаемости пород по георадарному профилю, принятого равным 9, показало, что угол падения структурного нарушения, выявленного георадарным об-



**Рис. 4**  
Интерпретированная радарограмма георадарного профилирования ограждающей дамбы хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК»

**Fig. 4**  
Interpreted radarogram of georadar profiling of the enclosing dam of the tailing dump of Kovdor GOK JSC

следованием в массиве скальных пород, составляет 23 град.

Среди других исследований необходимо отметить оценку качества БВР, локализацию размеров и формы закола на откосе уступа, оценку степени водонасыщенности близ поверхностных пород и др. [14; 15].

Выполнено также георадарное обследование предгорья Ковдорского горнорудного массива, представляющего собой природно-техническую систему, подвергающуюся периодическим взрывным (волновым) воздействиям. Выявлен и трассирован на глубину до 100 м в массив пород скрытый под мореной и сильнотрещиноватыми породами крупный тектонический разлом, представляющий потенциальную опасность для устойчивости борта карьера и промышленных сооружений.

В течение последних 10 лет георадарные обследования применяются для мониторинга состояния ограждающих дамб хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК», в целях минимизации рисков фильтрационно-деформационных процессов. На рис. 4 приведена интерпретированная радарограмма георадарного профилирования ограждающей дамбы хвостохранилища, на которой цветами отражена степень водонасыщенности грунтов.

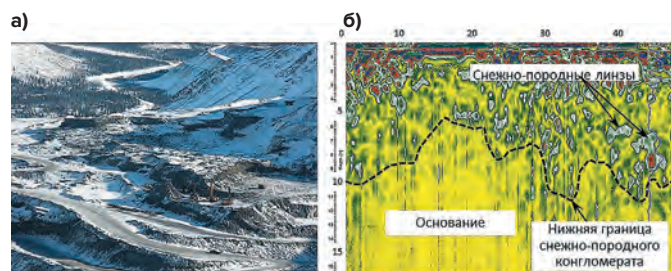
Сопоставительный анализ данных пьезометров об уровне воды и значений скорости электромагнитной волны позволил определить интервал изменения скорости (8,017–8,165 см/нс) и диэлектрической проницаемости (14,0–13,5 ед.), соответствующих установившемуся в теле дамбы уровню воды на момент измерений. В расположенном выше уровня грунтовых вод сухом и уплотненном грунте значения скорости изменяются в интервале 8,170–9,672 см/нс (диэлектрическая проницаемость, соответствен-



но, от 13,5 до 9,62 ед.). Снижение скорости электромагнитной волны ниже уровня воды обусловлено повышением диэлектрической проницаемости, что, в свою очередь, связано с увеличением объемов воды в поровом пространстве и водонасыщением грунтов дамбы.

Для АО «Ковдорский ГОК» выполнена оценка фильтрационной устойчивости ограждающих накопители сооружений, выявлены и локализованы потенциально опасные фильтрационно-деформационные процессы, определены механизмы повышенной фильтрации, формирования фильтрационных каналов. Был раскрыт механизм инфильтрации воды из накопителя в действующий карьер, реализующийся в формировании в теле ограждающей насыпной дамбы трех зон механической суффозии с повышенными фильтрационными характеристиками. Выявлены зависимости устойчивости ограждающих накопительных промышленных отходов сооружений от скорости и объемов фильтрующихся вод.

На АО «Апатит» выполнена оценка внутренней структуры породных отвалов карьера «Центральный» в целях выявления уплотненных породно-снежно-ледяных зон (линз) (рис. 5), а перспективный участок рудника «Восточный» дифференцирован по литологической разности пород и руд.



**Рис. 5**  
Георадарные исследования снежно-породных отвалов:  
а – общий вид;  
б – интерпретированная радарограмма с детализацией и нижней границей снежно-породного конгломерата

**Fig. 5**  
GPR studies of snow-rock dumps: (a) general view; (b) interpreted radargram with detailing and the lower boundary of the snow-rock conglomerate

Для ГОК «Олений Ручей» СЗФК георадарными исследованиями, выполняемыми с 2012 г., проведены: оценка качества подготовки котлована для сооружения хвостохранилища, площадок для приемо-перегрузочных железнодорожных терминалов, сооружения ограждающих дамб, мониторинг фильтрационно-деформационных процессов, функциональность дамбы вторичного отстойника, качество сооружения фундаментов под мельницы. С применением георадарных комплексов проведено поверхностное зондирование площадки под строительство хвостохранилища, а также сделана оценка качества уплотнения грунтов при поэтапной отсыпке ограждающих дамб. В целях контроля состояния и эффективности работы ГТС хвостохранилища был создан наблюдательный полигон, включающий в себя: линии универсальных контрольно-наблюдательных реперов (для классической наземной и GPS геодезии) на всех ограждающих дамбах, сеть гидрогеологических скважин и пьезометров, линии постоянных георадарных и сейсмических профилей.

На ГТС АО «Кольская ГМК» мониторинговые наблюдения проводятся с 2014 г. Хвостохранилище обогатительной фабрики ОАО «Кольская ГМК» овражного типа, по способу заполнения – намывное, предназначено для непрерывно-

го складирования хвостов обогащения медно-никелевых руд и обеспечения фабрики чистой оборотной водой по замкнутому циклу оборотного водоснабжения. Ограждающие дамбы хвостохранилища (Северная и Южная) протяженностью около 4 км каждая, относятся к I классу капитальности. На ГТС хвостохранилища ежегодно проводятся мониторинговые наблюдения, включающие в себя: высокоточные режимные геодезические измерения по контрольным реперам; исполнительную съемку откосов по створам дамб; топографическую съемку текущей ситуации дамб; техническое нивелирование гребней дамб обвалования и намывных дамб; измерения длин намывных пляжей и уровня воды; промер глубин отстойного пляжа с измерением толщины донных отложений.

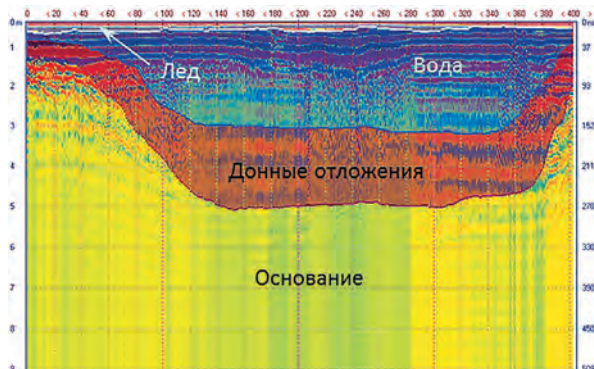
Кроме того, институтом был решен ряд задач для АО «Апатит» и АО «ОЛКОН». На гидротехнических сооружениях (плотинах) отстойников Восточного рудника АО «Апатит» были выполнены режимные мониторинговые геофизические исследования, в результате которых была получена детальная информация об их структуре и состоянии. В процессе сравнительного анализа были выделены проблемные участки в теле ГТС, за развитием которых впоследствии велось инструментальное наблюдение с более высокой периодичностью. Для повышения качества инструментального мониторинга деформационных процессов в теле ГТС были заложены контрольные реперы/марки и организован геодезический полигон.

Для оценки объемов отложений в отстойнике в зоне сброса хвостов обогащения фабрики АНОФ-2 (АО «Апатит») на площади участка 3,6 га было проведено георадарное зондирование. Анализ полученных результатов позволяет выявить следующие особенности отстойника промышленных вод: толщина ледового покрова составляет около 1,5 м; на границе донных отложений с водой отмечается резкая смена волновой картины, что дает возможность четко определить глубину водоема на исследованном участке, которая составляет порядка 6–8 м; подошва отложений идентифицирована по интенсивным осям синфазности более сложной формы по сравнению с донным отражением и поэтому уверенно выделяется; коренные отложения отличаются от донных отложений на радарограмме характером осей синфазности; глубина залегания коренных пород составляет от 1–2 м у берега до 5 м при удалении от береговой черты (рис. 6).

Особенностью мониторинговых работ на хвостохранилище АО «ОЛКОН» было определение притока и оттока воды в бассейне ГТС, составление водного баланса хвостохранилища и выявление его значимости. Для этих целей в зимний период были выполнены два цикла измерения глубины водоема при помощи георадарного зондирования с поверхности льда. В прудке-отстойнике хвостохранилища было выполнено профилирование по сетке с шагом 150×150 с жесткой привязкой в узловых точках путем измерения глубины воды. Была выполнена топографическая съемка по периметру ледового покрова, а по результатам обработки георадарных данных произведен расчет объемов воды в хвостохранилище. В летний период произведены с водной поверхности замеры глубины прудка-отстойника хвостохранилища, выполнена съемка пляжного контура воды, а на участке дамбы с повышенной фильтрацией был произведен эксперимент с применением флюоресцирующего раствора в целях определения скорости и объемов фильтрующейся воды.

Для АО «ОЛКОН» георадарными определениями (2019–





**Рис. 6**  
Интерпретированная  
радарограмма обследования  
отстойника промышленных вод  
(АНОФ-2 КФ АО «Апатит»)

**Fig. 6**  
Interpreted radarogram of the  
inspection of the industrial  
water sump (ANOF-2 KF  
JSC «Apatit»)

2022 гг.) выполняется мониторинг накопителя промышленных отходов (оценка динамики техногенных и природных водопритоков, трассирование фильтрационных водотоков, локализация зон повышенной водонасыщенности грунтов) для обеспечения промышленной и экологической безопасности накопителя. Выявлены особенности консолидации намывных отходов в накопителе, определяемые климатическими условиями западной части Арктики [2].

Отдельно следует отметить георадарное обследование площадки здания ТЭЦ ОАО «Арктикуголь» в пос. Баренцбург (о. Шпицберген). Целью работ являлось выявление верхнего контура мерзлоты, который, по данным инженерно-геологических изысканий 25-летней давности, располагался на глубине 6,2–6,7 м от дневной поверхности. Георадарным определением было установлено, что верхний контур мерзлых пород на момент работ расположен на глубине 6,5–7,5 м на различных участках обследуемой площадки.

В целом за период 2009–2022 гг. для решения различных горно-геологических и геотехнических задач георадарные исследования были выполнены на более чем 20 объектах всех крупных горнодобывающих предприятий западной части Арктики: АО «Кольская ГМК», АО «ОЛКОН», ООО «Ловозерский ГОК», КФ АО «Апатит», ГОК «Олений ручей» СЗФК, АО «Ковдорский ГОК».

### Список литературы

1. 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. М.: Ваш полиграфический партнер; 2010. 130 с.
2. Калашник А.И., Максимов Д.А., Калашник Н.А., Дьяков А.Ю., Запорожец Д.В., Мелихов М.В. Многоуровневые комплексные исследования и мониторинг хвостохранилищ горнодобывающих предприятий северо-западной части российского сектора Арктики. Апатиты: КНЦ РАН; 2022. 250 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.465.5>
3. Козырев А.А., Савченко С.Н., Панин В.И., Семенова И.Э., Рыбин В.В., Федотова Ю.В. и др. Геомеханические процессы в геологической среде горнотехнических систем и управление геодинамическими рисками. Апатиты: КНЦ РАН; 2019. 431 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
4. Benter A., Moore W., Antolovich M. GPR signal attenuation through fragmented rock. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A: Mining Technology*. 2016;125(2):114–120. <https://doi.org/10.1080/14749009.2015.1110950>
5. Денисенко И.А., Лунина О.В., Гладков А.С., Казаков А.В., Серебряков Е.В., Гладков А.А. Структура Дельтового разлома и сейсмические смещения на участке «Шерашево–Инкино» по данным георадиолокации (Байкальский регион). *Геология и геофизика*. 2020;61(7):879–888. <https://doi.org/10.15372/GiG2019074>
6. Bricheva S.S., Deev E.V., Dubrovin I.O., Doroshenkov M.M., Entin A.L., Panin A.V. Ground-penetrating radar evidence of faulting in unconsolidated coarse sediments. In: *NSG2021 27th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, August, 2021*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2021. Vol. 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120241>
7. Александров П.Н., Морозов Ю.А., Кулаковский А.Л., Матвеев М.А., Смутьская А.И., Соколова Ю.Ф. Изучение приповерхностной структуры метаморфических толщ георадарным методом (Северное Приладожье). *Геофизические исследования*. 2020;21(1):5–23. <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-1>
8. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. 2021;12(11):2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>

### Заключение

Опыт проведения работ и полученные результаты позволяют уверенно констатировать, что георадарное подповерхностное зондирование, обладающее такими качествами, как оперативность и информативность, является эффективным дополнением (а в отдельных случаях – самостоятельным средством) инженерных исследований и мониторинга горнотехнических сооружений для условий западной части российского сектора Арктики. Показано, что применение георадарных обследований как неразрушающего метода исследования позволяет получать детализированную сплошную (профильную) картину внутренней структуры и водонасыщенности пород и грунтов горнотехнических сооружений. Используя ключевое положение, что наведенное георадаром электромагнитное поле искажается на участках различия физических свойств скальных пород и грунтов (неоднородности, повышенная трещиноватость, тектонические нарушения, разломы, зоны повышенного водонасыщения и т. п.), выполнены их идентификация и количественная оценка. Приведены результаты георадарных обследований конкретных объектов крупных горнодобывающих предприятий западной части Арктики. На основе этого выявлены особенности строения скальных пород карьера Железный АО «Ковдорский ГОК», рудника Восточный КФ АО «Апатит» и др. Выявлены и трассированы скрытые тектонические разломы и неоднородности массива, представляющие потенциальную опасность для горных работ и промышленных сооружений. На основе многолетних мониторинговых георадарных обследований ограждающих дамб хвостохранилищ АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», ГОК «Олений ручей» СЗФК, АО «ОЛКОН» установлены закономерности формирования фильтрационно-деформационных процессов. Для ГОК «Олений ручей» выполнены оценка качества сооружения ограждающих дамб хвостохранилища, строительства бетонных фундаментов для мельниц и железнодорожных погрузо-разгрузочных терминалов. На острове Шпицберген георадарными обследованиями уточнена верхняя граница мерзлых пород под площадкой ТЭЦ АО «Арктикуголь». К настоящему времени георадарные обследования выполнены на более чем 20 горнотехнических сооружениях горнодобывающих предприятий западной части Арктики.



9. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-Penetrating Radar Imaging of Near-Surface Deformation along the Songino Active Fault in the Vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8242. <https://doi.org/10.3390/app11178242>
10. Chamyal L.S., Joshi P., Vasaiakar S., Maurya D.M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India. *Journal of the Palaeontological Society of India*. 2022;67(1):72–84. Available at: [https://www.palaeontologicalsociety.in/vol67\\_1/7.%20PSI-IBSV-Chamayal.pdf](https://www.palaeontologicalsociety.in/vol67_1/7.%20PSI-IBSV-Chamayal.pdf)
11. Kobayashi T., Sun C., Choi J.-H. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2022;58(4):445–455. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.445>
12. Kobayashi T., Ko K., Choi S.-J., Choi J.-H. Orthogonal Dual Polarization GPR Measurement for Detection of Buried Vertical Fault. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022;19:4022805. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3156295>
13. Bali B.S., Wani A.A. Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of PirPanjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR). *Natural Hazards*. 2021;105(2):1–14. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04428-4>
14. Дьяков А.Ю., Калашник А.И. Методические основы георадарных исследований горнотехнических объектов. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН; 2021. 110 с. <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3>
15. Калашник А.И., Дьяков А.Ю. Георадарное исследование геолого-структурного строения рабочего уступа карьера. *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. 2015;(6):73–78.

## References

1. Godzikovskaya A.A., Asming V.E., Vinogradov Yu.A. *Retrospective analysis of primary data on seismic events recorded on the Kola Peninsula and adjacent territory in the 20<sup>th</sup> century*. Moscow: Vash poligraficheskii partner; 2010. 130 p. (In Russ.)
2. Kalashnik A.I., Maksimov D.A., Kalashnik N.A., Dyakov A.Yu., Zaporozhets D.V., Melikhov M.V. *Multilevel integrated studies and monitoring of tailings of mining enterprises in the northwestern part of the Russian sector of the Arctic*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2022. 250 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.465.5>
3. Kozyrev A.A., Savchenko S.N., Panin V.I., Semenova I.E., Rybin V.V., Fedotova Yu.V. et al. *Geomechanical processes in the geological environment of mining systems and geodynamic risk management*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2019. 431 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.391.7>
4. Benter A., Moore W., Antolovich M. GPR signal attenuation through fragmented rock. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Section A: Mining Technology*. 2016;125(2):114–120. <https://doi.org/10.1080/14749009.2015.1110950>
5. Denisenko I.A., Lunina O.V., Gladkov A.S., Kazakov A.V., Serebryakov E.V., Gladkov A.A. Coseismic motion on the delta fault within the Sherashevo-Inkino site (Baikal area): GPR evidence. *Russian Geology and Geophysics*. 2020;61(7):879–888. <https://doi.org/10.15372/RGG2019074>
6. Bricheva S.S., Deev E.V., Dubrovin I.O., Doroshenkov M.M., Entin A.L., Panin A.V. Ground-penetrating radar evidence of faulting in unconsolidated coarse sediments. In: *NSG2021 27<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, August, 2021*. European Association of Geoscientists & Engineers; 2021. Vol. 2021, pp. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202120241>
7. Aleksandrov P.N., Morozov Y.A., Kulakovskij A.L., Matveev M.A., Smulskaya A.I., Sokolova Y.E. Studying of the metamorphic stratum subsurface structure by the georadar method (the Northern Ladoga region). *Geophysical research*. 2020;21(1):5–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/gr2020.1-1>
8. Ercoli M., Cirillo D., Pauselli C., Jol H.M., Brozzetti F. Ground-penetrating radar signature of Quaternary faulting: a study from the Mt. Pollino region, southern Apennines, Italy. *Solid Earth*. 2021;12(11):2573–2596. <https://doi.org/10.5194/se-12-2573-2021>
9. Bano M., Tsend-Ayush N., Schlupp A., Munkhuu U. Ground-Penetrating Radar Imaging of Near-Surface Deformation along the Songino Active Fault in the Vicinity of Ulaanbaatar, Mongolia. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8242. <https://doi.org/10.3390/app11178242>
10. Chamyal L.S., Joshi P., Vasaiakar S., Maurya D.M. Neotectonic characterization of the Narmada-Son Fault (NSF) using field and GPR data, Gujarat, western India. *Journal of the Palaeontological Society of India*. 2022;67(1):72–84. Available at: [https://www.palaeontologicalsociety.in/vol67\\_1/7.%20PSI-IBSV-Chamayal.pdf](https://www.palaeontologicalsociety.in/vol67_1/7.%20PSI-IBSV-Chamayal.pdf)
11. Kobayashi T., Sun C., Choi J.-H. Near-surface fault investigation by Ground Penetrating Radar (GPR) surveys. *Journal of the Geological Society of Korea*. 2022;58(4):445–455. <https://doi.org/10.14770/jgsk.2022.58.4.445>
12. Kobayashi T., Ko K., Choi S.-J., Choi J.-H. Orthogonal Dual Polarization GPR Measurement for Detection of Buried Vertical Fault. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2022;19:4022805. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2022.3156295>
13. Bali B.S., Wani A.A. Analysis of neotectonic structures in the piedmont region of PirPanjal Range NW Himalaya by integrating geomorphic indicators coupled with geophysical transects (GPR). *Natural Hazards*. 2021;105(2):1–14. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04428-4>
14. Dyakov A.Yu., Kalashnik A.I. *Methodical bases of GPR studies of mining facilities*. Apatity: Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences; 2021. 110 p. (In Russ.) <https://doi.org/10.37614/978.5.91137.443.3>
15. Kalashnik A.I., Diakov A.Iu. Georadar research of geological-structural configuration of open pit working bench. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2015;(6):73–78. (In Russ.)

### Информация об авторах

**Калашник Анатолий Ильич** – кандидат технических наук, руководитель лаборатории геофлюидомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.kalashnik@ksc.ru

**Дьяков Андрей Юрьевич** – научный сотрудник лаборатории геофлюидомеханики, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты, Российская Федерация; e-mail: a.dyakov@ksc.ru

### Информация о статье

Поступила в редакцию: 03.02.2023

Поступила после рецензирования: 20.02.2023

Принята к публикации: 21.02.2023

### Information about the authors

**Anatolii I. Kalashnik** – Cand. Sci. (Eng.), Head of laboratory, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.kalashnik@ksc.ru

**Andrey Y. Dyakov** – Scientific Researcher, Mining Institute Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation; e-mail: a.dyakov@ksc.ru

### Article info

Received: 03.02.2023

Revised: 20.02.2023

Accepted: 21.02.2023