

УДК 622.33:550.8(571.56-191.2)

**ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ
НЕГАТИВНЫХ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Л. Л. Федорова, Г. А. Куляндин, Д. В. Саввин

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, E-mail: igds@igds.ysn.ru,
просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Республика Саха (Якутия), Россия*

Проведены геофизические исследования на угольном разрезе “Кангаласский” с помощью методов георадиолокации и электротомографии. Описаны основные геокриологические особенности в массиве и толще грунтов водозащитной дамбы. Разработана методика выполнения работ и получены характеристики волновых полей. Представлены георадиолокационные исследования по выявлению зоны обводнения во взрываемом блоке и прослеживанию динамики сезонно-талого слоя. Выполнен комплексный анализ данных георадиолокации и электротомографии при установлении негативных криогенных процессов в основании дамбы. Показана возможность применения георадиолокации для прогнозирования развития негативных криогенных процессов.

Георадиолокация, электротомография, криолитозона, геокриологические условия, криогенные процессы, обводнение, сезонно-талый слой, вскрышные породы, водозащитная дамба, угольный разрез “Кангаласский”

DOI: 10.15372/FTPRPI20190618

При освоении месторождений, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых пород, возникает необходимость детального изучения геокриологической обстановки. Под воздействием проводимых горных работ происходят естественные и техногенные изменения всего комплекса природных условий, влияющих на эффективность и рациональность освоения месторождений. Прочностные, тепло- и электрофизические, фильтрационные и другие свойства массивов пород криолитозоны определяются геокриологическими условиями. Недостаточное изучение может привести к активизации геомеханических процессов, связанных с протаиванием мерзлых пород, содержащих значительное количество льда. Появляются нарушения теплового режима, увеличения водопритока и обводнения горных пород. Это вызывает незапланированные деформации пород с последующим обрушением или сдвижением.

Основные геокриологические параметры месторождений — распространение многолетней мерзлоты и ее прерывистость, температура пород в подошве слоя годовых теплооборотов, влажность (льдистость) горных пород, условия залегания подземных льдов, мощность

сезонно-талого слоя, надмерзлотные воды и талики. С протаиванием и промерзанием горных пород связаны негативные криогенные процессы: морозобойное растрескивание, морозное пучение, наледи, обводнение, суффозия термокарст и солифлюкция, осложняющие ведение горных работ.

Разработка вскрышных пород месторождений криолитозоны проводится с предварительным буровзрывным рыхлением. В условиях низких температур, высокой льдистости, влажности пород горные работы затрудняются повторным смерзанием взорванного массива, что отрицательно сказывается на работе оборудования [1]. Обводненность и повышенная влажность способствуют налипанию, примерзанию пород к рабочим органам выемочно-погрузочного оборудования и кузовам транспортных средств, простоям и удорожанию себестоимости разработки. Знание особенностей поведения горных пород криолитозоны необходимо при контроле устойчивости грунтов оснований горнотехнических сооружений. Взаимодействие с геологической средой вносит большие изменения в природный температурный и водный режим многолетнемерзлых пород. В сложных геокриологических условиях очевиден неразрушающий контроль криогенного состояния массива горных пород и оснований горнотехнических сооружений.

Георадиолокация и электротомография — широко используемые геофизические методы, обеспечивающие достаточную для практических целей глубину исследований 10–15 м [2–6]. Георадиолокация дает возможность изучать строение горных пород по отражению электромагнитного сигнала, электротомография — их электрофизические свойства по удельному электрическому сопротивлению. В настоящей работе приведены результаты применения этих методов при описании водозащитной дамбы угольного разреза “Кангаласский”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Кангаласское бурогольное месторождение находится в зоне распространения многолетней мерзлоты в 40 км севернее г. Якутска. Основные рабочие пласты месторождения “Нижний” и “Верхний” залегают на глубине 3.7–38.3 м и плавно погружаются под углом 1–2° в северном направлении с увеличением мощности от 5.23 до 6.00 м и от 7.43 до 13.30 м соответственно. Пласты разделены породным прослоем средней мощностью 2.74 м [7, 8]. Вскрышные породы представлены четвертичными отложениями глины, суглинка, супеси с прослоями различных песков [8]. Все породы вскрыши относятся к категории слабольдистых, твердомерзлых грунтов.

Гидрогеологические условия участка работ достаточно просты, выделяются два типа вод. Подмерзлотные воды не влияют на эксплуатацию разреза из-за глубокого залегания. Надмерзлотные воды сезонно-талого слоя зимой полностью промерзают и функционируют в теплое время года в пределах деятельного слоя. Водоупорное основание для этих вод — верхняя поверхность многолетнемерзлых пород. Мощность деятельного слоя 0.3–3.0 м, основной источник питания — атмосферные осадки [8]. При ведении вскрышных работ встречаются водонасыщенные участки на глубине > 3 м.

Горные выработки угольного разреза обводняются за счет атмосферных осадков в летнее время и таяния снега весной. По химическому составу воды деятельного слоя гидрокарбонатные с минерализацией до 1 г/л. Для защиты участка добычных работ от притока с возвышенностей рельефа поверхностных вод строятся дамбы и водоотводные каналы [7]. На одной из таких дамб проведены георадиолокационные исследования геокриологических особенностей и строения. Она сформирована из вскрышных пород, геологические основания — те же породы, но в естественном залегании (рис. 1).



Рис. 1. Участок проведения геофизических исследований. Водозащитная дамба, июнь 2018 г.

Для исследования геокриологических особенностей горных пород вскрыши и грунтов водозащитной дамбы на экспериментальном участке проведены измерения методом георадиолокации, определяющим, не разрушая целостность массива, геометрию его строения, а в некоторых случаях — свойства слагающих пород [9, 10]. Он применяется для изучения геологического строения массива горных пород и наблюдения за состоянием оснований инженерных сооружений [10–13].

Георадиолокация осуществляется по намеченным профилям с установкой параметров съемки, соответствующих конкретным условиям и поставленным задачам. При георадиолокации на участках открытых горных работ сталкиваются с трудностями по перемещению антенного блока вдоль профиля. Извлечение данных осложнено антропогенным влиянием, иногда природными условиями, техникой и добычными работами. Неравномерное перемещение георадара приводит к искажению данных непрерывной съемки. На неровных участках и местах скопления валунов не обеспечивается оптимальный режим излучения из-за потери контакта антенн с поверхностью. Для корректных результатов георадиолокация выполняется в дискретном режиме или параметрическими измерениями. В условиях ограниченного пространства и пересеченной местности используется угловое георадиолокационное сканирование, выдающее радарограмму аналогично реализации методики профилирования из одной точки наблюдений [14]. Техника полевых георадиолокационных работ на действующих месторождениях включает профилирование, дискретные и параметрические зондирования в отдельных точках на линии профилей.

Георадиолокация выполнена георадарами серии “ОКО-2” группы компаний “ЛогиС-Геотех” (г. Москва). Анализ геологического строения и ранее проведенные работы показали, что георадар в спектре частот 100–500 МГц (антенные блоки АБ-150, АБ-250, АБ-400) позволяет получить георадиолокационный разрез с разрешающей способностью 0.15–0.35 м и выделить границы в пределах деятельного слоя 2.5–3.0 м. На участке водозащитной дамбы георадиолокация дополнена бурением и электротомографией с аппаратурой “Омега-48” (“ЛогиС-Геотех”) [15, 16].

Данные электротомографии проходили через программу ZondRes2D, георадиолокации — с применением стандартного программного обеспечения георадаров серии “ОКО-2” программы Geoscan32 [17, 18]. Первичная обработка включала выбор временного окна обработки, корректировку начала и конца радарограммы. Далее радарограммы обрабатывались с помощью различных процедур для выделения осей синфазности от отражающих границ.

При последующей интерпретации полученных данных опираются на априорную информацию об участке. Если этого недостаточно, выбираются интерпретационные признаки неоднородностей горных пород, выработанные в результате моделирования и экспериментальных исследований [19]. Типичные волновые поля, встречающиеся на радарограмме при изучении многолетнемерзлых горных пород, связаны с зонами повышенной влажности, суффозии и участками пучения грунтов.

Зоны повышенной влажности показаны на радарограмме в виде отраженных кратных электромагнитных волн на границе сильновлажных и сухих (мерзлых) грунтов (рис. 2а). При выделении зон повышенной влажности эти волны выступают в качестве индикатора, по которому устанавливают местоположение увлажнения по глубине и расстоянию. Зоны суффозии образуются в результате выноса водным потоком части грунтов определенной фракции, что приводит к нарушениям горизонтально-слоистого строения. Наличие нарушенных структур, вызванных ослаблением грунтов, на радарограммах отображается дифракцией электромагнитных волн и получением хаотичных сигналов отражений (на рис. 2б отмечено прямоугольником). Зоны пучения грунтов на радарограмме представляются в виде линзообразных объектов, сформированных протяженными осями синфазности, наиболее уверенно проявляющиеся в процессе протаивания грунтов, когда возникают дополнительные отражающие границы и локальные зоны, связанные с изменением мерзлотно-грунтовых условий участка (рис. 2в).

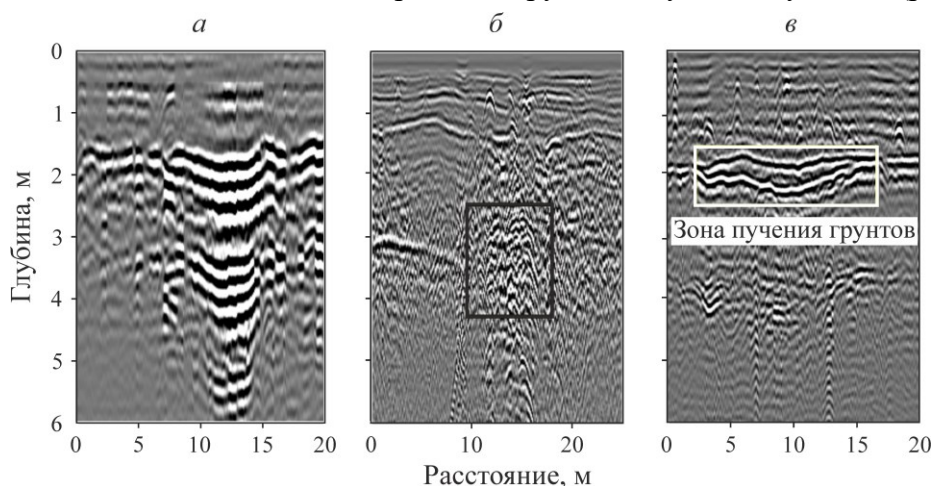


Рис. 2. Криогенные процессы в горных породах на радарограмме: а — слой повышенной влажности; б, в — зоны суффозии и пучения грунтов

ВЫЯВЛЕНИЕ ЗОН ОБВОДНЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Георадиолокационные исследования зоны обводнения и повышенной влажности проводились георадаром с антенным блоком АБ-150 по взрывному блоку. Особенность выбранного участка — залповые выбросы воды из расположенных рядом скважин на высоту несколько метров при бурении взрывных скважин. Некоторые из них оказались залиты водой. При известной геологии месторождения произошедшее является уникальным случаем, так как участок находился на возвышенности и все породы в пределах месторождения многолетнемерзлые.

Профили проложены между рядов скважин, заполненные водой скважины визуально выявлены и отмечены на плане. Рассмотрим данные георадиолокации по профилю, проложенному по третьему ряду скважин. Измерения осуществлялись в непрерывном режиме с временной разверткой 200 нс, что при средней диэлектрической проницаемости $\varepsilon' = 4$ (мерзлые породы) определяет возможную глубину исследований до 15 м. Реальная глубина георадиолокации на участке 7 м.

Граница контакта мерзлых (сухих) и талых (влажных) горных пород устанавливалась по появлению на радарограммах высокоамплитудных низкочастотных сигналов с кратными отражениями. По этому признаку выявлены сезонно-талый слой 1 в пределах 1 м и зона обводнения 2 сложной формы протяженностью 13–45 м с переменной мощностью от подошвы сезонно-талого слоя до 7 м по глубине (рис. 3). Георадиолокационными исследованиями обнаружена зона обводнения во взрывном блоке.

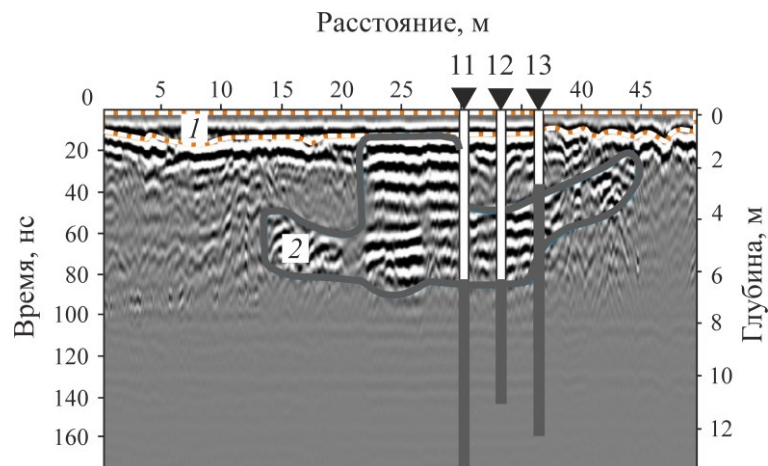


Рис. 3. Зоны обводнения во вскрышных горных породах: 1 — сезонно-талый слой; 2 — зона обводнения по данным георадиолокации; 11–13 — скважины

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ

Наблюдения за изменением глубины протаивания в толще грунтов водозащитной дамбы велись 3 мес. Обследование участка началось в июне 2018 г. георадаром “ОКО-2” с антенным блоком АБ-250 (центральная частота 250 МГц) (рис. 4). По намеченному профилю длиной 83 м ежемесячно осуществлялись георадиолокационные исследования и бурение скважин на отметках 5 и 46 м для определения мощности сезонно-талого слоя. Точки для бурения выбирались после рекогносцировочных работ в местах, где хорошо прослеживались отражающие границы на радарограмме. В качестве основного поискового признака сигналов, отраженных от границ сезонно-талого слоя и мерзлых грунтов на радарограмме, принималась последовательность высокоамплитудных низкочастотных сигналов, полученных на контрастной границе “талый слой – мерзлая толща”. Контрастность обусловлена разницей в значениях диэлектрической проницаемости для мерзлых горных пород (~ 4) и талых (> 9) [12]. В результате на радарограмме подошва сезонно-талого слоя прослеживалась в виде протяженной непрерывной оси синфазности сигналов (рис. 4).

Ниже сезонно-талого слоя наблюдалась еще одна менее контрастная граница — геологическое основание дамбы. Глубина протаивания увеличилась. Подошва сезонно-талого слоя опускалась в толщу геологического основания дамбы на отрезке 0–17 м, а на отрезке 17–65 м входила в контакт с ним (рис. 4в). Зафиксирован момент, который в некоторых случаях приводит к дренированию воды через породы геологического основания или образованию зеркала скольжения, ведущему к разрушению дамбы. Дальнейшие изучения подтвердили развитие негативных криогенных явлений.

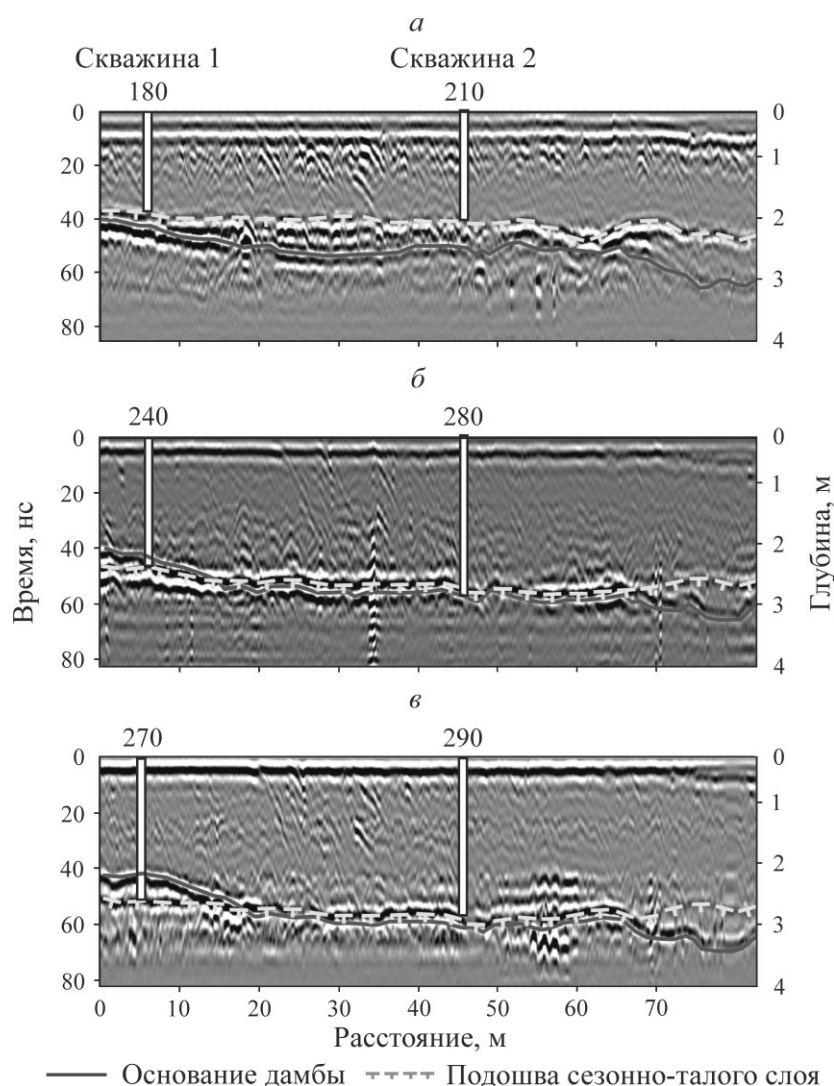


Рис. 4. Мерзлотные условия грунтов оснований водозащитной дамбы по данным георадиолокации в июне (а), июле (б) и августе (в): 180–290 — глубина сезонно-талого слоя, см

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОН РАЗВИТИЯ КРИОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Исследования возможностей геофизического выявления опасных криогенных процессов осуществлялись на основе комплексного анализа данных георадиолокации и электротомографии. Измерения выполнялись георадаром “ОКО-2М” с антенным блоком 400 МГц и электро-разведочной аппаратурой “Омега-48”. Геофизический профиль проложен вдоль дамбы в октябре в период максимальной оттайки пород геологического разреза. Длина профиля 96 м, мощность насыпных грунтов 2.5–3.5 м (пески талые), ниже грунты геологического основания (пески различного гранулометрического состава и плотности, мерзлые).

Глубинность исследований электротомографии установкой Шлюмберже составила 8.5 м (длина косы 96 м, 48 электродов, шаг 2 м), а георадиолокации, проводимой с применением методики непрерывного профилирования с датчиком перемещения ДП-32, — 4.5 м. Для определения мощности насыпных грунтов, их весовой влажности и кровли мерзлых горных пород на профиле пробурено две заверочные скважины на расстоянии 5 и 46 м. Установлено, что влажность насыпных грунтов 7–8%, влажность пород геологического основания 12–22%, т. е. зависит от накопления воды на кровле многолетнемерзлых пород.

На рис. 5а показан геоэлектрический разрез с разделением геологической толщи на относительно высокоомную верхнюю (до 800 Ом·м), низкоомную среднюю (170–240) и высокоомную нижнюю часть (800 Ом·м и выше). В соответствии с геологическими и геоэлектрическими данными верхняя часть разреза дамбы до глубины 2.3 м сложена песками малой влажности (область I). Слой пониженного удельного электрического сопротивления 170–240 Ом·м (область II) на глубинах 1.2–6.5 м связан с областью повышенной влажности и водонасыщенных пород, водоупором которой являются мерзлые грунты с удельным электрическим сопротивлением 800–2000 Ом·м (область III).

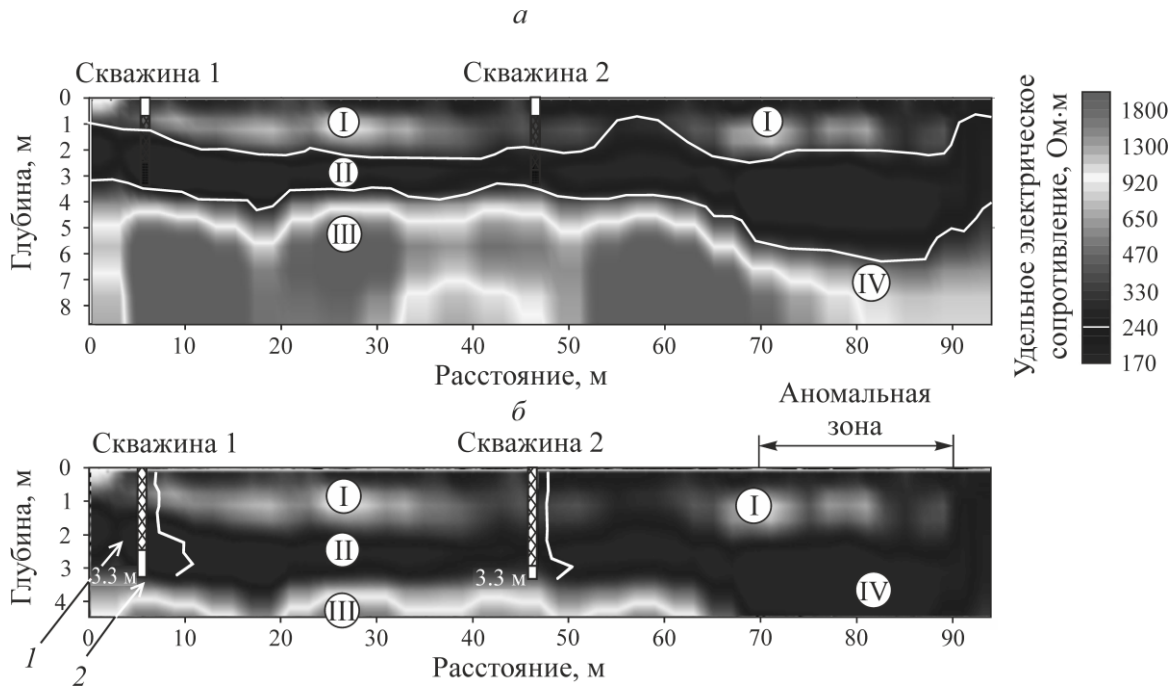


Рис. 5. Аномальные зоны с проявлениями негативных криогенных процессов в основании дамбы по результатам совместной обработки и интерпретации геофизических данных: а — геоэлектрический разрез; б — георадиолокационный разрез; I — зона маловлажных (сухих) песков на глубине 0.5–2.0 м (удельное электрическое сопротивление до 800 Ом·м); II — область повышенной влажности и водонасыщенных пород на глубине 1.2–6.5 м (170–240 Ом·м); III — мерзлые породы (800–2000 Ом·м); IV — зона развития негативных криогенных процессов (<240 Ом·м); 1 — подошва насыпных грунтов дамбы; 2 — кровля мерзлых пород

На георадиолокационном разрезе глубиной до 4.5 м выделяются две границы, сопоставленные с данными бурения и привязанные к ним (рис. 5б). Средняя диэлектрическая проницаемость пород по разрезу $\epsilon' = 8$. Первая граница 1 определена на глубинах 2.0–3.2 м и соответствует подошве насыпных грунтов дамбы. По данным электротомографии, граница 1 не устанавливается. На глубине 3.3 м граница 2 интерпретируется с кровлей мерзлых пород, что согласуется с данными бурения и электротомографии (область III). Область I с относительно высоким значением сопротивлений до 800 Ом·м на георадарном разрезе проявляется хаотичными отражениями, присутствием гиперболических и наклонных границ.

Прослеживается хорошая сходимость результатов при выделении аномальной зоны в правой части разреза на расстоянии 70–90 м профиля (область IV). По данным георадиолокации, в этой области увеличивается время задержки сигналов от подошвы насыпных грунтов, а также затухание и отсутствие гладкой или четкой корреляции осей синфазности отраженных волн,

что совпадает с низкими значениями удельного электрического сопротивления по показателям электротомографии ($< 240 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). В результате совместной интерпретации геофизических данных на участке развиваются негативные криогенные процессы.

Вследствие проникновения поверхностных вод в тело насыпи с размыванием грунтов основания и оттайкой мерзлых пород началось разрушение дамбы (рис. 6). Наблюдались трещины отседания, простирающиеся параллельно уступу, а также разрушение борта и сток воды в карьер.



Рис. 6. Разрушение южного борта дамбы в августе 2018 г. Фото предоставлено ведущим инженером ИГДС СО РАН Д. С. Козловым

ОТОБРАЖЕНИЕ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД В ГИС

Для улучшения качества визуализации геофизических данных разработан и апробирован программный комплекс, включающий специализированный алгоритм выявления геокриологических особенностей массива горных пород и интерпретации данных георадиолокации. Алгоритм основан на установленных признаках георадиолокационных волновых полей, зон повышенной влажности, суффозии и пучения пород. Для автоматизированной обработки георадиолокационных данных используются дисперсионный и корреляционный анализы. Геокриологические особенности массива горных пород проявляются на георадиолокационном разрезе зонами с хаотичным распределением осей синфазности сигналов. Образование подобных сигналов приводит к увеличению такой статистической характеристики, как дисперсия, фиксирующей отклонение амплитуд сигналов от среднего ожидаемого значения. По росту дисперсии амплитуд сигналов определяется пространственное положение аномальных зон, а анализ особенностей характера изменения значения по разрезу устанавливает тип неоднородности: относительно сглаженное изменение дисперсии обуславливает слоистую неоднородную структуру, резкие изменения дисперсии соответствуют нарушенной структуре с многочисленными локальными неоднородностями [20].

Программный комплекс включает базу данных со специализированной структурой, позволяющей хранить материалы исследований (радарограммы, GPS-привязки, фото, видео, паспорта скважин) и геоинформационную систему с разработанными модулями импорта, обработки, анализа и визуализации результатов георадиолокации [21]. На рис. 7 представлен пример использования разработанного программного комплекса для отображения результатов георадиолокационных исследований грунтов основания водозащитной дамбы в геоинформационной системе. По профилю выделены и интерпретированы согласно разработанным признакам геокриологические особенности грунтов, связанные с участками повышенной влажности, пучения пород и зон суффозии.

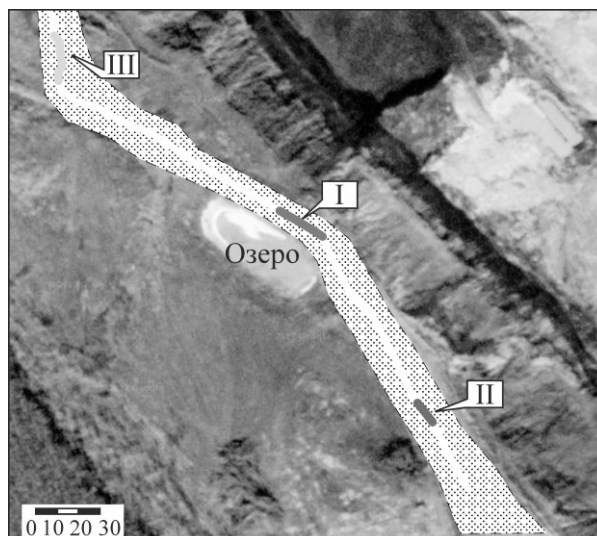


Рис. 7. Зоны неоднородностей горных пород по георадиолокационному профилю дамбы в геоинформационной системе: I — участок повышенной влажности; II — пучение пород; III — зона суффозии

ВЫВОДЫ

Установлена эффективность применения георадиолокационного метода для выявления геокриологических особенностей массива горных пород и тела водозащитной дамбы в границах поля разреза “Кангаласский”. Выявлен сезонно-талый слой мощностью 1 м и околонулена до глубины 7 м зона обводнения вскрышных пород, осложняющая проведение буровзрывных работ.

На основе анализа данных периодических георадиолокационных измерений выделены участки с повышенной глубиной сезонно-талого слоя, обусловленные деградацией мерзлоты, что увеличивает риски разрушения дамбы. Совместная обработка геофизических данных и их интерпретация на основе бурения позволили уточнить по значениям удельного электрического сопротивления границы грунтов с различным криогенным состоянием. Выявлена область повышенной влажности и водонасыщенности пород, водоупором которой являются мерзлые горные породы. С использованием разработанного программного комплекса обнаружена зона разрушения водозащитной дамбы, связанная с обводнением и оттайкой мерзлых пород. Полученные данные помогают повысить точность геокриологического прогноза развития негативных криогенных процессов в грунтах оснований горнотехнических сооружений и увеличить эффективность превентивных мер их инженерной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панишев С. В., Каймонов М. В. Методический подход к прогнозу производительности драглайна при разработке взорванной горной массы в карьерах криолитозоны // ФТПРПИ. — 2017. — № 4. — С. 98–104.
2. Arcone S. A., Lawson D. E., Delaney A. J., Strasser J. C., and Strasser J. D. Ground-penetrating radar reflection profiling of groundwater and bedrock in an area of discontinuous permafrost, *J. Geophysical*, 1998, Vol. 63. — P. 1573–1584.
3. Beres M. Jr. and Haeni F. P. Application of ground penetrating radar methods in hydrogeologic studies, *J. Ground Water*, 1991. — P. 375–386.
4. Yingzhao Ma, Yinsheng Zhang, Farhan S. B., and Yanhong Guo. Permafrost soil water content evaluation using high-frequency ground-penetrating radar in amdo catchment, central Tibetan plateau, *GPR 2012, Proc. of the 14th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, Shanghai, China, 2012, Vol. 2.* — P. 571–574.

5. **Оленченко В. В., Шенин А. Н.** Возможности геофизических методов при поисках плейстоценовой мегафауны в пойменных и надпойменных отложениях реки Юрибей (Ямал) // Криосфера Земли. — 2013. — Т. XVII. — № 2. — С. 83–92.
6. **Соколов К. О.** Частотно-временное представление георадиолокационных разрезов на основе непрерывного вейвлет-преобразования // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 77–81.
7. **Гаврилов В. Л., Ермаков С. А., Хосоев Д. В.** Оценка состояния открытой разработки угольных месторождений центральной и северной Якутии // ГИАБ. — 2010. — № 11. — С. 29–36.
8. **Корректировка** горно-транспортной части проекта реконструкции разреза “Кангаласский” (пересмотр 2001 г.): проектная документация 4633-ИОС 1.2. — Владивосток: Мечел, ОАО “Дальвост-НИИпроектуголь”, 2010. — Т. 3. — 118 с.
9. **Набатов В. В.** Использование информационной энтропии в качестве идентификатора выявления строения массива горных пород с помощью низкочастотных георадаров // ФТПРПИ. — 2017. — № 2. — С. 190–200.
10. **Harry M. J.** Ground penetrating radar: theory and applications, Elsevier, 2009. — 524 p.
11. **Pajewski L., Benedetto A., Derobert X., Giannopoulos A., Loizos A., Manacorda G., Marciniak M., Schettini C., and Trinks I.** Applications of ground penetrating radar in civil engineering COST action TU1208, Proc. 7th Int. Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, 2013. — P. 1–6.
12. **Омельяненко А. В., Федорова Л. Л.** Георадиолокационные исследования многолетнемерзлых пород. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2006. — 136 с.
13. **Барышников В. Д., Хмелинин А. П., Денисова Е. В.** Диагностика состояния бетонной обделки горных выработок на наличие в ней неоднородностей с помощью георадиолокационного метода // ФТПРПИ. — 2014. — № 1. — С. 30–38.
14. **Kulyandin G. A., Omelyanenko A. V., and Omelyanenko P. A.** Methods of GPR angular scanning, GPR 2014, 15th Int. Conf. on Ground Penetrating Radar, Brussels, 2014. — P. 571–574.
15. **Vobachev A. A., Jakovlev A. G., and Jakovlev D. V.** Electrical resistivity tomography — high-resolution electrical prospecting with direct current, J. Eng. Geol., 2007. — P. 31–35.
16. **Многоканальный электроразведочный аппаративно-программный комплекс “Омега-48”** / Логис-Геотех. URL: http://www.geotech.ru/market/katalog_oborudovaniya/elektrozvedochnaya_apparatura_i_apparatura_dlya_elektrotomografii/mnogokanalnyj_elektrozvedochnyj_apparaturno-programmnyj_kompleks_omega-48/ (дата обращения 28.06.2019 г.).
17. **Каминский А. Е.** Инструкция к программе двумерной интерпретации данных метода сопротивления и вызванной поляризации ZondRes2D. — СПб.: Zond Software, 2012.
18. **GeoScan32.** Программа управления Георадаром “ОКО-2” и визуализации получаемых данных: иллюстрированное руководство пользователя. URL: <http://logsys.ru/download/new/geoscan32manual.pdf> (дата обращения 28.06.2019 г.).
19. **Федорова Л. Л., Саввин Д. В., Мандаров Д. А., Федоров М. П.** Георадиолокационная диагностика криогенных процессов в грунтах оснований автодорог г. Якутска // Инж. изыскания. — 2017. — № 9. — С. 36–43.
20. **Федорова Л. Л., Соколов К. О., Саввин Д. В., Федоров М. П.** Георадиолокационное картирование структурных неоднородностей массива горных пород россыпных месторождений криолитозоны // ГИАБ. — 2014. — № 11. — С. 267–273.
21. **Соколов К. О., Федорова Л. Л., Саввин Д. В., Стручков А. С.** Обоснование структуры и функциональности алгоритмического обеспечения георадиолокационного мониторинга влажности горных пород криолитозоны // Фундаментальные исследования. — 2017. — № 9. — С. 93–98.

Поступила в редакцию 09/VII 2019

После доработки 26/XI 2019

Принята к публикации 27/XI 2019