

щие такими температурными характеристиками (особенно в деятельном слое интервале 1–3 м), могут переходить в пластично-мерзлое и талое состояния.

В дисперсных грунтах, где разница в рассчитанных температурах начала замерзания засоленного грунта выше 0,4°C, в солевом составе, как правило, преобладает NaCl (60–80%) и Na₂SO₄ (40–50%) и иногда присутствуют MgCl₂ и CaCl₂. Это указывает на криогенную метаморфизацию, связанную с отжатием солей при протаивании–промерзании, или на миграцию солей вместе с пленочной влагой.

В целом обе формулы являются приемлемыми для расчетов, но для супесей и суглинков деятельного слоя, в составе которых преобладают хлориды и сульфаты натрия, и, особенно, когда встречаются хлориды магния и кальция, предпочтительней использовать формулу (1), так как она учитывает солевой состав грунтового (порового) раствора.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 15–45–05050 «Экспериментальные исследования формирования и эволюции техногенных криопэгов на урбанизированной территории криолитозоны в Центральной Якутии» (2015 г.), а так же при финансовой поддержке Гранта им. академика П.И. Мельникова для молодых ученых, аспирантов Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН и студентов СВФУ – 2016.

Литература

1. Глинка Н.Л. Общая химия. – Л.: Наука, 1976. – 712 с.
2. Курчатова А.Н. Влияние техногенных наледей на засоленность литогенной основы городских ландшафтов Якутии // Криолитозона и подземных вод Сибири. – Якутск, 1996. – Ч.2. – С. 95–105.
3. Макаров В.Н. Геохимия мерзлотных почв в сфере влияния городского техногенеза // Геохимия техногенеза. – Новосибирск: Наука, 1986. – С. 118–124.
4. Павлова Н.А., Данзанова М.В., Сериков С.И. Оценка техногенного влияния на обводненность и гидрохимическую обстановку г. Якутска // Геоэкология. – 2014. – № 3. – С.207–214.
5. Роман Л.Т., Артюшина В.И., Иванова Л.Г. Зависимость прочности мерзлых засоленных грунтов от температуры начала замерзания грунтовой влаги // Геоэкология. – 1994. – № 1. – С.49–55.
6. СП 25.13330.2012. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04–88. – М., 2012. – 119 с.
7. Торговкин Н.В., Макаров В.Н. Агрессивность сезонно-талых и мерзлых грунтов Якутска // Наука и образование. – 2014. – № 1. – С. 85–89.
8. Шац М.М., Сериков С.И. Современное обводнение территории г. Якутска // Наука и образование. – 2009. – № 4. – С.76–80.

Поступила в редакцию 20.06.2016

УДК 551.345:550.837.7

Изменения геокриологического состояния насыпных ГТС в Западной Якутии и оптимизация их мониторинга комплексом электроразведочных методов геофизики

В.Н. Ефремов*, А.В. Дроздов**

**Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск*

***НИИП Институт «Якутнипроалмаз» АК «АЛРОСА», г. Мирный*

На основе натурных наблюдений предложены пути для повышения эффективности мониторинга геокриологического состояния насыпных гидротехнических сооружений (ГТС) в криолитозоне с использованием оптимального комплекса геофизических методов. Рассмотрены основные природные факторы, влияющие на температуру грунтов ГТС, и возможности геофизических методов для мониторинга их состояния в условиях Западной Якутии. Из них, как наиболее значимо влияющие на состояние мерзлых грунтов ГТС, выделены средняя годовая и минимальная температуры приземного воздуха наряду с длительностью холодного периода. С учетом данных условий предложены подходы к оптимизации использования комплекса геофизических методов. Для примера их реализации пред-

ЕФРЕМОВ Владимир Николаевич – д.т.н., в.н.с., vne@mpi.ysn.ru; ДРОЗДОВ Александр Владимирович – гл. специалист-геофизик, DrozdovAIV@alrosa.ru.

ложен оптимальный комплекс электроразведочных методов геофизики на постоянном и переменном токе с использованием РМТ зондирования в течение всего года. Входящие в данный комплекс методы ВЭЗ и ВЭЗ-ЧД позволяют, используя методики электротомографии, получить разрезы, наглядно демонстрирующие распределение кажущегося сопротивления и модуля диэлектрической проницаемости в массиве горных пород, составляющих ГТС. Использование в комплексе РМТ зондирования позволит получить наиболее полную картину расположения и развития в грунтах ГТС талых и водоносных зон в двумерном и трехмерном изображении.

Ключевые слова: мерзлота, геокриологическое состояние, мониторинг, геофизические методы.

Changes of a Geocryologic Condition of Earthfill Dams in Western Yakutia and Optimization of Monitoring by a Complex of Geophysical Electroprospecting Methods

V.N. Efremov*, A.V. Drozdov**

*Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

**«Yakutniproalmaz» Research and Design Institute, JSC ALROSA, Mirny

Based on field observations, this study proposes ways to improve the efficiency of permafrost monitoring in earthfill dams by using the optimal combination of geophysical methods. It discusses the main environmental factors controlling dam embankment temperatures. It is found that the most important factors are mean annual and minimum near-surface air temperatures and cold period length. The capabilities of geophysical methods for dam thermal monitoring in Western Yakutia are considered. Some approaches are proposed on how to optimize the use of several geophysical methods in application to the existing conditions. The optimal combination of DC and AC electrical resistivity applied with RMT sounding year round is presented as an example. The VES and VES-FR methods used with ERT procedures provide profiles of apparent resistivity and dielectric permittivity module in the earthfill. The use of RMT in complex with electrical techniques will provide better 2-D and 3-D representation of the location and development of thaw and water-bearing zones in the dams.

Key words: permafrost, geocryological condition, monitoring, geophysical methods.

Введение

Освоение природных ресурсов территории Западной Якутии сопровождается строительством гидротехнических сооружений (ГТС). Существуют значительные затруднения при проведении строительства и эксплуатационном мониторинге ГТС, вызываемые особенностями состояния сезонно- и многолетнемерзлых грунтов. Компания «АЛРОСА» проводит мониторинг своих гидротехнических сооружений в соответствии с нормативными документами, разработанными с целью обеспечения безопасной эксплуатации, что в первую очередь гарантирует устойчивую работу предприятий и снижает риски развития нештатных ситуаций, влияющих на экологию [1].

ГТС являются ответственными сооружениями и для проведения постоянного мониторинга в условиях развития многолетнемерзлых грунтов оборудуются комплексом измерительной аппаратуры (КИА) в соответствии с ПБ 03-438-02 от 28.01.2002. В состав КИА входят:

– пьезометрические скважины, позволяющие контролировать уровеньную поверхность фильтрационного потока;

– термометрические скважины, позволяющие наблюдать за динамикой температурного режима горных пород, глубиной их сезонного промерзания–протаивания и криогенными процессами (пучением, термокарстом, морозобойным растрескиванием, солифлюкцией и т.п.) в ограждающей дамбе (плотине) и ее основании, в бортовых примыканиях, в основании и элементах конструкций водопроводящих сооружений.

Однако целостную картину изменений, происходящих в теле и основании ГТС, можно получить, лишь проводя мониторинг с учетом результатов исследований межскважинного пространства комплексом наземных геофизических методов.

Кроме природных факторов на состояние ГТС оказывают влияние процессы, вызванные влиянием теплового фронта, формируемого запасами воды в водохранилище, а также процессы, происходящие в теле и основании плотины, при возникновении мест сосредоточенной фильтрации. В настоящей работе эти процессы мы рассматривать не будем, а остановимся только на природных факторах, влияющих на состояние ГТС и на методах их измерения.

Методические особенности

Для примера, показывающего температурные изменения в теле и основании ГТС в годовом цикле, приведем результаты измерений, полученных по одной термометрической скважине, представленные в виде температурно-временного разреза (рис.1).

Динамика изменений показывает, что температура пород на глубине 10–20 м изменяется в течение года в пределах от минус 15°C до плюс 5°C с образованием талой зоны, существующей в период с июля по декабрь. В верхней части разреза с мая формируется сезонно-талый слой, мощность которого достигает своего максимума (в пределах 4 м) к середине октября.

Согласно существующим нормативам, надежность насыпных напорных гидротехнических сооружений, построенных в криолитозоне, зависит от соблюдения проектного температурного режима грунтов тела и основания плотины. Отсюда следует первое, на что должны быть направлены любые геофизические методы – это оценка мерзлотно-гидрогеологического состояния тела, основания и примыканий плотины по данным, полученным в результате геофизической съемки. Это соответствует одной из задач, регламентируемых правилами безопасной эксплуатации ГТС, а именно, проведением натурных наблюдений за состоянием откосов, берм и гребня плотин, их береговых примыканий, проверкой на наличие просадок, трещин, подвижек, оползней, оплывин, суффозионных и других негативных явлений. Натурные наблюдения за состоянием накопителей проводятся в соответствии с заданной в проекте программой и периодичностью. Натурными наблюдениями контролируется соответствие параметров и состояния сооружений их критериям безопасности [2].

Природные факторы, влияющие на температуру грунтов насыпных ГТС при наступлении холодного периода года (для территории Западной Якутии это, в среднем, середина октября–конец апреля), представляются следующими: длительность холодного периода; минимальная температура воздуха; среднегодовая температура воздуха; количество выпавших атмосферных осадков или толщины снежного покрова.

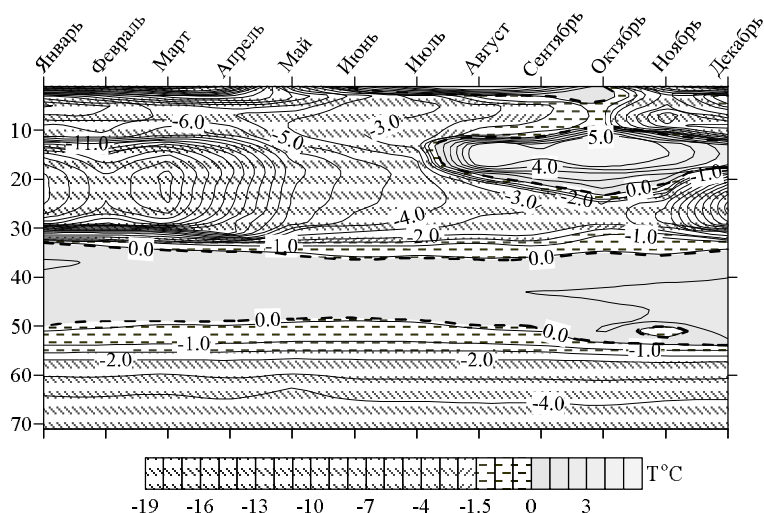


Рис. 1. Изменение температуры пород на различной глубине с января по декабрь 2012 г. по одной из термометрических скважин в ГТС

На рис. 2 показан график минимальных годовых температур за период с 2009 по 2014 г. (а) и график средних годовых температур за тот же период (б). Как видно из рисунка, колебания среднегодовых температур весьма значительны (изменения в 4,3 раза) и не могут не отразиться на состоянии изучаемого разреза.

Осадки в виде снега служат для ГТС защитой от воздействия низких температур воздуха и препятствуют промерзанию грунтов, поэтому службы эксплуатации счищают снег с поверхности ГТС так, чтобы проморозить за холодный период грунты и повысить их прочность. Поэтому снежные осадки можно не учитывать как фактор, влияющий на состояние ГТС.

Из рассмотренных природных факторов наибольшее влияние на состояние ГТС оказывает изменение средней годовой температуры приземного воздуха, которое зависит, в том числе, и от минимальной годовой температуры воздуха, и от длительности холодного периода.

Последние два фактора не постоянны и создают ту переменную температурную среду,

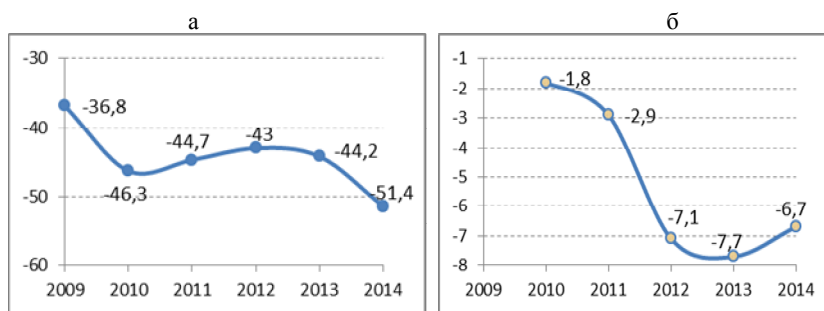


Рис. 2. Межгодовые изменения природных факторов влияния на состояние ГТС в районе г. Мирного. Данные температурных наблюдений, взятые из интернет-источника [http://rp5.ru/Архив.Погода в Мирном \(Западный\)](http://rp5.ru/Архив.Погода_в_Мирном_(Западный))

которая по-разному влияет на состояние изучаемых объектов. При сравнении материалов изученности разных лет видно, что не всегда аномалии, присутствующие на геоэлектрических разрезах, находятся в одних и тех же местах. Из-за изменения природных условий мы можем наблюдать «блуждание» аномальных зон по разрезу и только места сосредоточенной фильтрации всегда будут находиться на одном месте, но ее интенсивность, как и положение аномальных зон будут зависеть от вышеперечисленных факторов и фиксироваться геофизическими методами.

Обсуждение результатов

Геофизические методы на ГТС Западной Якутии применяются как на стадии строительства, так и на стадии их эксплуатации. Регламентируемые системы мониторинга не могут предоставить информацию о процессах, происходящих в пространстве между контрольными створами, оборудованными пьезометрическими и термометрическими скважинами. Именно по этой причине, начиная с 2002 г., на ГТС Западной Якутии стали регулярно использоваться геофизические методы для мониторинга их состояния. Проведение 1 или 2 раза в год дополнительных геофизических исследований, связывающих и дополняющих информацию, полученную по существующим системам мониторинга, поможет принимать оптимальные управленческие решения для организации безопасной эксплуатации ГТС.

Для хвостовых хозяйств ГОКов представляет интерес проведение изучения насыпных ГТС

электроразведочными методами геофизики два раза в год. При этом получение информации о состоянии тела плотины должно приходиться на следующие периоды годового цикла:

- максимального сезонного промерзания грунтов (март–апрель);
- максимального сезонного протаивания грунтов (август–октябрь).

Полученная информация позволит отразить изменения геокриологических условий, происходящие в насыпных сооружениях в различные периоды года.

Особенности температурного состояния грунтов насыпной ГТС отражаются на результатах геофизических измерений. Так, на электро-томографических разрезах результаты измерений, полученных методом ВЭЗ на одном объекте в разные годы, имеют существенное отличие (рис. 3).

Если в мае 2007 г. кажущиеся сопротивления со значениями меньше 200 Ом·м наблюдались лишь в сезонно-талом слое, то в июне 2012 г. подобно малыми значениями выделяются уже талые зоны и в теле плотины.

Межгодовое и межсезонное различия в геоэлектрических характеристиках наблюдаются в измерениях электромагнитного сопротивления грунтов радиоимпедансным профилированием, проведенном на стационаре «Туймаада» в годовом цикле (рис. 4). Электромагнитное сопротивление представляет собой отношение эффективных значений электрического сопротивления и относительной диэлектрической проницаемости [3], рассчитанных по измерениям модуля и

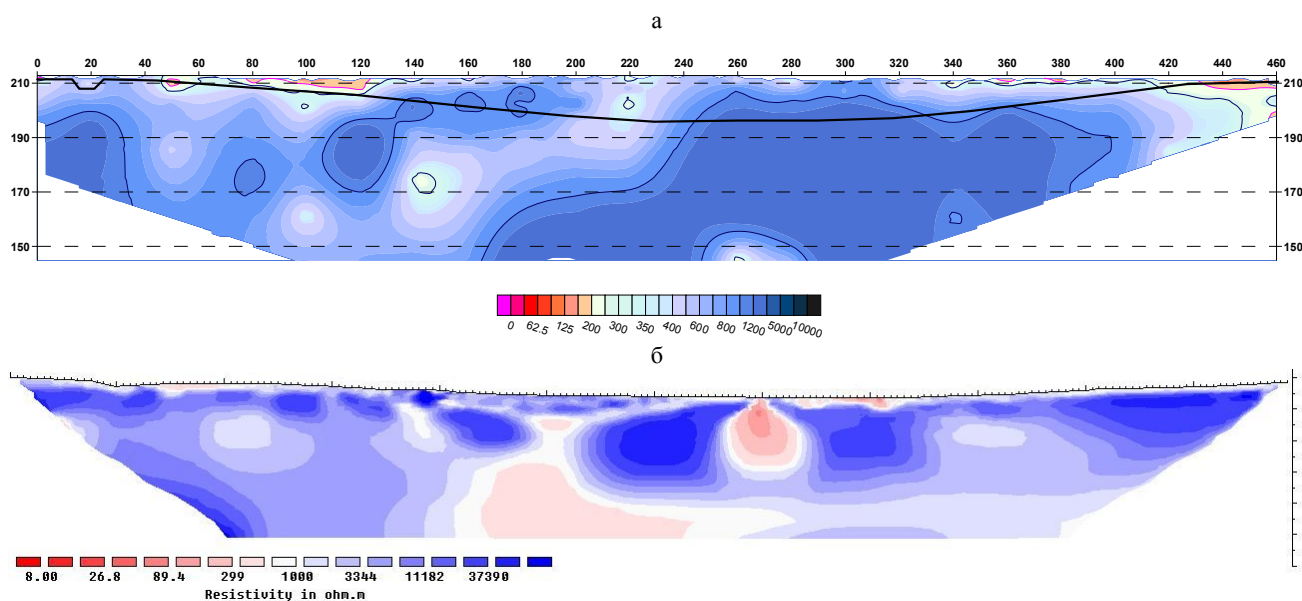


Рис. 3. Сравнение кажущихся сопротивлений по разрезам ВЭЗ на одном и том же объекте по состоянию на май 2007 г. (а) и июнь 2012 г. (б)

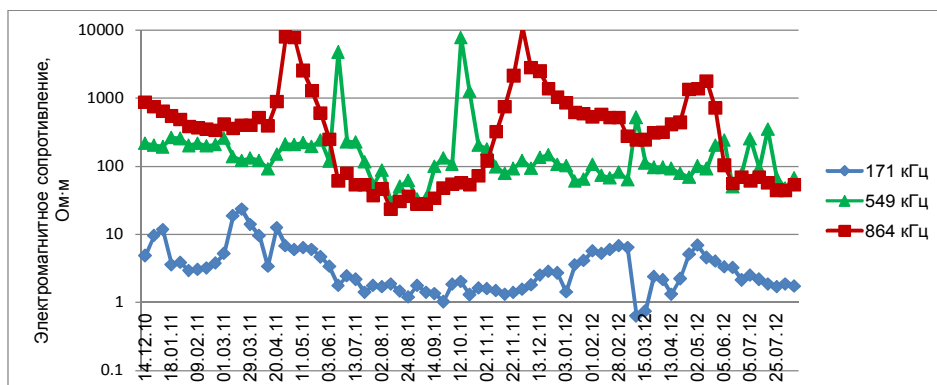


Рис. 4. Изменения во времени электромагнитного сопротивления грунтов на экспериментальной площадке стационара «Туймаада» ИМЗ СО РАН

фазы поверхностного импеданса (РЭМП, СДВ-радиокип, РМТ).

Сезонные отличия здесь наиболее значимы для электромагнитного сопротивления на сравнительно высокой частоте (864 кГц). Это указывает на перспективность мониторинга состояния ГТС по данному параметру.

Опыт применения различных методов геофизики

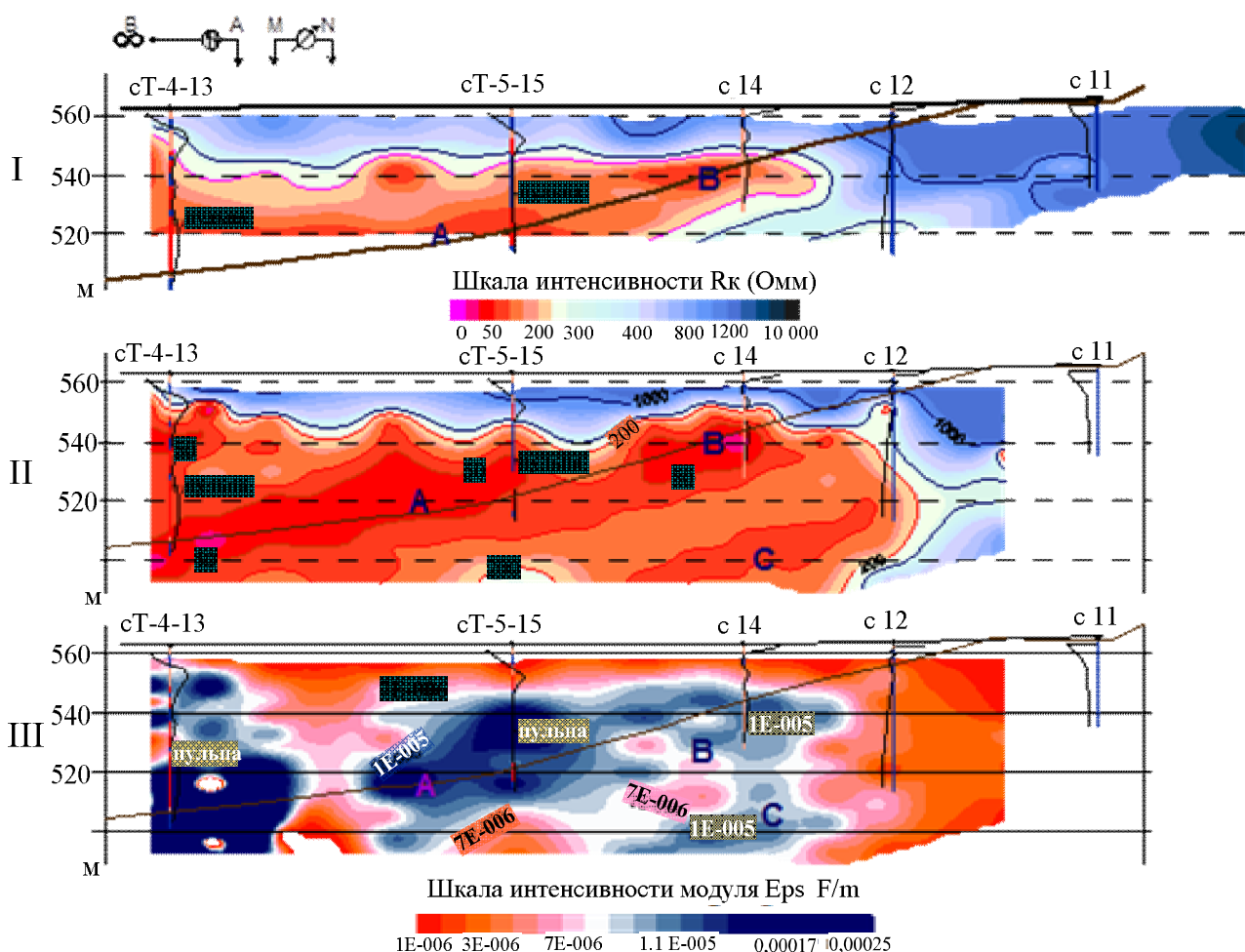


Рис. 5. Геоэлектрические разрезы по результатам ВЭЗ-ЧД с поверхности ГТС

Результаты работ методом ВЭЗ-ЧД по изучению зон фильтрации в левобережном примыкании ограждающей дамбы ОФ-14

Профиль 01 берма 562 м.

I) Разрез изолиний сопротивления (625 Гц) - июнь 2003 г.

II) Разрез изолиний сопротивления (1,25 Гц) -август 2003 г.

III) Разрез изолиний модуля комплексной диэлектрической проницаемости (625 Гц) август 2003 г.

А, В, С. Участки талых водонасыщенных пород
предполагаемые участки фильтрации в породах основания
ограждающей дамбы

0 50 100

зики для изучения геокриологического состояния ГТС показывает, что наиболее приемлемыми и информативными для решения данной задачи являются методы электроразведки. Вызвано это тем, что реакция на изменение температурного режима мерзлых грунтов, на образование в них талых зон и их обводнение наиболее значимо выражается в изменении их электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости.

На этом основании принципы, которым необходимо следовать при выборе оптимального комплекса методов, представляются следующими:

- возможность определения электрического сопротивления и диэлектрической проницаемости грунтов измерениями с поверхности не нарушающими их состояния методами;

- возможность качественного получения данных об этих параметрах в необходимое для наблюдений время.

В теплое время года, когда отсутствует проблема качественного заземления электродов, для мониторинговой съемки подходят широко известные методы ВЭЗ и ВЭЗ-ЧД. Применение их в современной модификации, называемой электротомографией, позволяет получить разрезы, наглядно демонстрирующие распределение кажущегося сопротивления и модуля диэлектрической проницаемости (рис. 5). По изменению кажущегося сопротивления грунтов можно судить об изменении параметров и границ во времени. Высокими значениями модуля диэлектрической проницаемости выделяется расположение обводненных зон. Указанные методы эффективны, однако проблема с заземлениями электродов, появляющаяся с началом зимнего промерзания поверхности грунтов и продолжающаяся до окончания зимы, весьма затрудняет круглогодичные наблюдения. Недостатком также является и затруднение в точной интерпретации при наличии высокольдистого горизонта в теле плотины.

В зимних условиях достаточно информативным представляется радиоманнитотеллурическое (РМТ) зондирование, оперирующее при интерпретации инверсией кажущегося сопротивления и фазы поверхностного импеданса. Это бесконтактный метод, не требующий обеспечения заземлений, так как для зондирования методом РМТ высокольдистые слои не являются препятствием. В то же время по инверсии данных, полученных по профилю, этот метод дает полную картину расположения и развития в грунтах талых и водоносных зон в двумерном и трехмерном изображении. В комплексе с электротомографией, при совместной двумер-

ной инверсии данных, метод РМТ дает достаточно детальный и полный геоэлектрический разрез на глубину до 100 м [4]. При этом возможно и получение данных о величине диэлектрической проницаемости.

Заключение

Учитывая сезонные диапазоны воздействия природных факторов на состояние насыпных ГТС, возможности геофизических методов и методические особенности применения, представляется рациональным их использование по следующей схеме.

Первые наблюдения за состоянием ГТС в годовом цикле необходимо проводить в период максимального сезонного оттаивания грунтов, перед наступлением холодного периода, т.е. в начале октября, а вторые – в конце холодного периода, перед началом сезонного оттаивания грунтов, т.е. в конце апреля.

В качестве наблюдаемых параметров для мониторинга состояния грунтов ГТС предлагаем наряду с электрическим сопротивлением грунтов использовать и диэлектрическую проницаемость как показатель фазового состояния воды в горных породах.

Для мониторинговых наблюдений предлагается включить в основной геофизический комплекс следующие методы: электротомографию (ВЭЗ, ВЭЗ-ЧД) и РМТ зондирование. Данные, полученные этими методами, существенно различающимися по измеряемым параметрам, позволяют провести совместную двумерную интерпретацию с повышенной точностью.

При необходимости проведения оперативной геофизической съемки в зимнее время предлагается использовать РМТ зондирование как бесконтактный и достаточно информативный метод.

В настоящее время при эксплуатации ГТС не учитывается прогноз изменения среднегодовой температуры воздуха и ее влияние на состояние сооружения. В будущем с учетом результатов мониторинга, соотнесенных с фактическими значениями среднегодовых температур воздуха, считаем необходимым использование и этих сведений для составления прогноза изменения состояния насыпных грунтов. Тогда прогнозируемые значения среднегодовых температур воздуха станут необходимым элементом прогноза состояния гидротехнических сооружений для своевременного принятия управленческих решений.

Литература

Федеральный закон от 21.07.97 № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» // URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi> (дата обращения: 18.12.2015).

1. *Постановление* Госгортехнадзора РФ от 28.01.2002 № 6 «Об утверждении Правил безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 16.04.2002 № 3372) // URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi> (дата обращения: 18.12.2015).

2. *Ефремов В.Н.* Новые возможности изучения мерзлых грунтов радиоимпедансным зон-

дированием // Проблемы инженерного мерзловедения: Материалы IX Международного симпозиума (3–7 сентября 2011 г., г. Мирный). – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – С. 469–475.

3. *Каминский А.Е., Ерохин С.А., Шлыков А.А.* Совместная двумерная инверсия данных электромографии и РМТ/АМТ // Геофизика. – 2015. – №4. – С. 32–39.

Поступила в редакцию 12.04.2016

УДК 622.02:621.396.96

Исследование изменения параметров георадиолокационных сигналов в процессе оттайки мерзлых дисперсных горных пород различной влажности

Л.Л. Федорова, Д.В. Саввин, К.О. Соколов, Г.А. Куляндин

Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск

Представлены результаты лабораторных зондирований георадаром «ОКО-2» с центральной частотой 1200 МГц образцов дисперсных горных пород различной влажности, замороженных в холодильной камере, с последующей оттайкой при температуре 22°C. Рассчитаны скорости распространения георадиолокационных сигналов в образцах при влажности от 3 до 22% и изменении температуры от –15°C до 15°C. В результате исследований установлено, что существенное различие скоростей распространения георадиолокационных сигналов при отрицательных и положительных температурах в двух типах песков четвертичных отложений наблюдается при влажности более 7%. Также описаны амплитудные значения георадиолокационных сигналов и их частотный состав в зависимости от температуры и влажности исследуемых образцов. Полученные результаты будут способствовать созданию автоматизированной системы контроля динамики влажности пород на горных объектах с последующим отображением данных в геоинформационной системе, применение которой перспективно для мониторинга физико-механических свойств горных пород бортов карьеров, кровли подземных горных выработок и грунтов оснований инженерных сооружений.

Ключевые слова: георадиолокация, дисперсные горные породы, оттайка, влажность, температура, диэлектрическая проницаемость, горные объекты, криолитозона.

Investigation of GPR Signals Parameters Changes during Defrosting Process of Frozen Dispersed Rocks of Different Humidity

L.L. Fedorova, D.V. Savvin, K.O. Sokolov, G.A. Kulyandin

Chersky Institute of Mining of the North SB RAS, Yakutsk

Laboratory studies are conducted on dispersed rock samples of different moisture content frozen in a refrigerating chamber, with the subsequent defrosting at temperature 22°C. According to the results of sensing by GPR OKO-2 with a center frequency of 1200 MHz delay time, amplitudes and spectral characteristic of the signals at varying moisture (from 3 to 20%) and temperature (from -15 to 15 °C) of rocks were determined. The results of the research showed a significant difference between the velocity of

ФЕДОРОВА Лариса Лукинична – к.т.н., зав. лаб., Lar-fed-90@rambler.ru; САВВИН Денис Валерьевич – к.т.н., н.с., deophysic@mail.ru; СОКОЛОВ Кирилл Олегович – к.т.н., н.с., k.sokolov@ro.ru; КУЛЯНДИН Гаврил Александрович – м.н.с., kgavrilu@yandex.ru.