

Электротомография грунтовой плотины мёрзлого типа

В.В. Оленченко* (ИНГГ СО РАН), П.С. Осипова (ИНГГ СО РАН)

Введение

На территории Крайнего Севера грунтовые плотины строятся по мёрзлому типу. Это означает, что тело плотины, её основание и сопряжение с берегами должны находиться в многолетнемёрзлом состоянии в течение всего периода эксплуатации [4]. В случае нарушения этого условия возникают изменения термического режима и криогенного строения грунтов, что приводит к изменению физико-механических, теплофизических и фильтрационных свойств пород оснований и материалов сооружений. По сквозным талым зонам происходят неконтролируемые утечки воды, а ослабление физико-механических свойств может привести к разрушению плотины [7].

Геофизические методы широко применяются при обследовании плотин [1, 2, 4-9]. Для выявления фильтрации в теле дамбы и береговых примыканиях хорошие результаты даёт метод электротомографии [1, 5, 7-9].

Мы использовали метод электротомографии (ЭТ) для обследования плотины на ручье Поисковый в Усть-Янском улусе Республики Саха (Якутия). Водоохранилище является источником хозяйственного и питьевого водоснабжения рабочего поселка Депутатский и теплоэлектростанции. В 1987 г было установлено, что через плотину происходит фильтрация воды в нижний бьеф. В последние годы было обнаружено, что при наполнении водоохранилища процесс фильтрации усиливается. Для разработки проекта по устройству противофильтрационной завесы были проведены геофизические исследования, основной целью которых являлся поиск зон фильтрации подземных вод по очагам протаивания в теле плотины, а также под ней по естественным подрусловым таликам и зонам трещиноватости в коренных породах.

Характеристика объекта

Объект исследований представлен каменно-земляной плотиной мёрзлого типа, расположенной на ручье Поисковый (рис. 1). Высота насыпи плотины I-ой очереди определяется профилем долины ручья и составляет на левобережном примыкании 7,6 м, на правобережном – 10,1, а в русле ручья, вблизи правобережья – 12,9 м. Ядро плотины возводилось «сухим» способом с укаткой грунта гружёными самосвалами. Оно имеет неоднородное строение. Характерной особенностью правобережного примыкания является большое содержание крупнозема в грунте (гальки и щебня, гравия и дресвы).

В основании плотины залегают песчаники и алевролиты среднеюрского возраста. Они перекрыты верхнечетвертичными делювиально-аллювиальными отложениями мощностью 3,7-7,7 м, представленными супесчано-суглинистым грунтом с примесью растительных остатков, переходящими с глубиной в супесь галечниковую, галечниково-щебенистую и гравийный грунт с супесчаным заполнителем. Кровля трещиноватых песчаников и алевролитов залегает на глубине 16,2-17,9 м, постепенно повышаясь на левобережном примыкании до глубины 7,6 м. Мощность сильновыветрелых пород, разрушенных до щебня, не превышает 0,3-0,7 м. Ниже залегают трещиноватые скальные породы. Трещины открытые, иногда заполнены кальцитом. Падение пород крутое, под углом 70-80°.

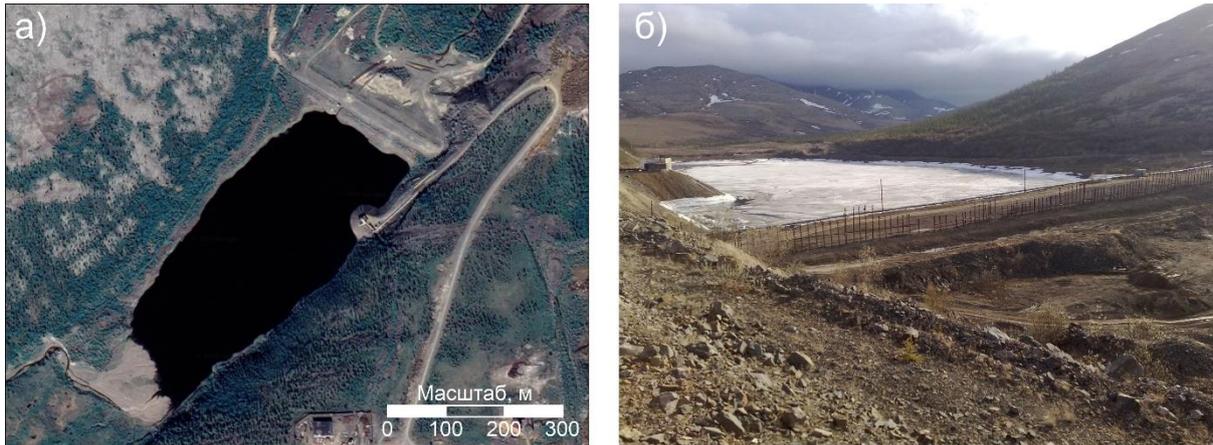


Рисунок 1. Космоснимок водохранилища (а) и вид на плотину (б) на ручье Поисковый.

В 1987-88 г.г. ЯкутскГИСИЗ проводил изыскания, по результатам которых были обнаружены три зоны фильтрации воды из водохранилища. Первая зона – в центральной части плотины с поверхности до глубины 3,5-5,5 м. Вторая зона – в правобережном примыкании. Третий талик приурочен к грунтам естественного залегания, представленным аллювиально-делювиальной толщей и сильнотрещиноватыми коренными породами. Последние являются естественным ложем ручья Поисковый. В основании плотины и на ее правобережном примыкании талик был вскрыт на глубине 16,1-18,6 м.

В 90-е годы прошлого века было принято решение об устройстве по гребню плотины сезонной охлаждающей установки (СОУ) для поддержания мерзлого состояния сооружения, однако в связи с экономическим кризисом проект не был завершён. Строительство СОУ остановилось на этапе установке труб по гребню плотины (рис. 1б). До настоящего времени СОУ не достроено и не работает.

Таким образом, фильтрация воды из водохранилища происходила по таликовым зонам в гребне плотины, правобережном примыкании и основании насыпи в течение последних 30 лет.

В 2011 году из-за обильных осадков произошло переполнение водохранилища и частичный прорыв плотины в центральной части вдоль труб сифонного сброса. В месте перетока воды через плотину образовался размыв, который впоследствии был засыпан грунтом.

Методика исследований

На участке исследования были выполнены электрические зондирования методом электротомографии по 6 профилям вдоль и 4 профилям поперёк плотины. Продольные профили располагались в верхнем бьефе вдоль верхового откоса, по гребню плотины, вдоль низового откоса и в нижнем бьефе в естественных условиях. Длина профилей выбиралась таким образом, чтобы их концы выходили за пределы гидротехнического сооружения в область естественного залегания пород. При длине плотины 300 м длина профилей составила 475 м (четыре 24-х канальных электроразведочных кабеля с межэлектродным шагом 5 м). Длина поперечных линий соответствовала длине двух стандартных кабелей и составляла 235 м. Расстояние между профилями 20-30 м.

В качестве измерительной аппаратуры применялась многоэлектродная электроразведочная станция «Скала-48». Последовательность подключения электродов соответствовала симметричной установке Шлюмберже. Максимальная глубинность исследований составила 35-40 м.

Обработка данных выполнялась с помощью программ Res2Dinv и Res3Dinv. При этом использовался робастный способ инверсии с учётом рельефа. Ошибка подбора двумерных моделей после 5 итераций составляла 4,9-7,6 %, для трёхмерной модели после 6 итераций подбора – 16,8 %.

Результаты

Интерпретационным критерием для выделения в плане и по глубине талых зон являлось их пониженное удельное электрическое сопротивление (УЭС) относительно мерзлых пород. К талым или растепленным (отрицательная температура около 0 °С) породам относились геоэлектрические комплексы с УЭС менее 1000 Ом·м. Высокий уровень УЭС талых пород обусловлен их литологическим составом. Они представлены крупнообломочными грунтами с песчаным и супесчаным заполнителем и скальными трещиноватыми породами.

В результате трехмерной инверсии была получена объёмная резистивная модель геологической среды в пределах участка исследований. Для анализа результатов инверсии были построены срезы УЭС на разных глубинах.

На рисунке 2 показаны планы распределения УЭС (планы изоом) на глубинах 4, 10, 20 м. Данные уровни выбраны исходя из следующих соображений. Глубина 4 м соответствует средней максимальной глубине сезонного промерзания, глубина 10 м близка к глубине нулевых годовых колебаний температуры. На глубине близкой к 20 м залегает кровля трещиноватых песчаников и алевролитов в тальвеге долины под гребнем плотины.

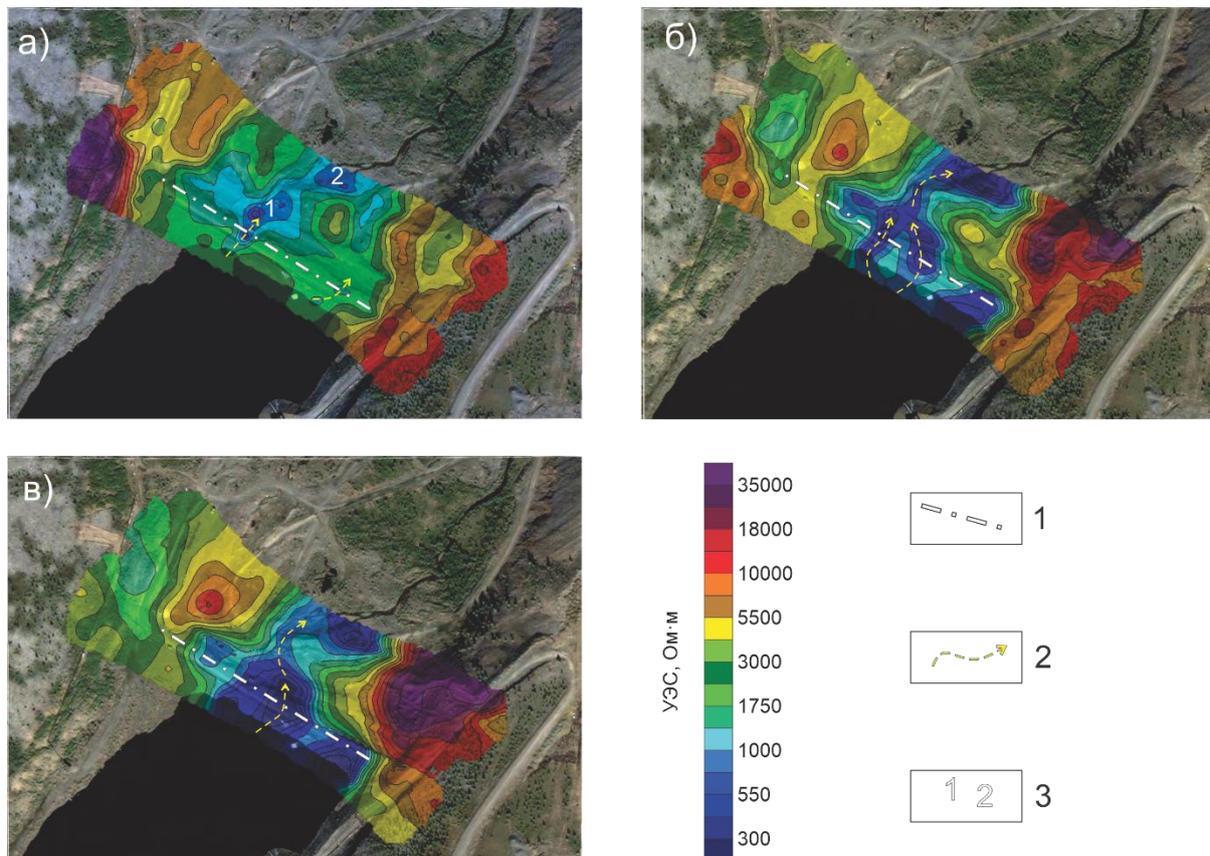


Рисунок 2. Карты распределения УЭС пород на глубине 4 (а), 10 (б) и 20 (в) метров по данным 3-D инверсии: 1 – ось плотины; 2 – пути фильтрации; 3 – номера аномалий низкого УЭС.

На глубине 4 м (рис. 2а) УЭС грунтов плотины и четвертичных отложений долины изменяется от 200 до 2500 Ом·м и определяется их литологическим составом и температурным режимом. На момент исследований (май) грунты на глубине 4 м находились в сезонномёрзлом и многолетнемёрзлом состоянии, поэтому области низких значений (менее 1000 Ом·м) интерпретировались как талики. Скальные грунты левого и правого бортов долины выделяются по УЭС от 3000 до 36000 Ом·м.

Ось плотины пересекают две аномалии низкого сопротивления – одна в центральной части, другая в правобережном примыкании. Подобным образом выделяются талики в гребне плотины, по которым идёт фильтрация (показана стрелками). Талик в правобережном примыкании был обнаружен ранее при изысканиях в 1988 году. Современные исследования показывают, что этот талик существует до сих пор.

Аномалия низкого сопротивления №1 (рис. 2а) в центральной части участка соответствует области размыва плотины в 2011 году, заполненной впоследствии суглинистым материалом. Аномалия пониженного УЭС №2 (рис. 2а) в нижнем бьефе связана с областью разгрузки подземных вод в виде ключа.

На глубине 10 м (рис. 2б) выделяются два основных пути фильтрации подземных вод через тело плотины (показаны стрелками), которые в нижнем бьефе объединяются в один поток. В левобережной части участка работ в коренных породах прослеживается линейно вытянутая в субмеридиональном направлении область пониженных УЭС до 2000 Ом·м. Вполне вероятно, что эта зона соответствует тектоническому нарушению в коренных породах.

На глубине 20 м со стороны верхнего бьефа грунты характеризуются низким (менее 500 Ом·м) УЭС, что говорит об их талом состоянии (рис. 2в). В нижнем бьефе в тальвеге долины аномалией низкого УЭС выделяется подрусловой талик. По характеру аномалий низкого сопротивления можно предположить, что в основании плотины существует талая зона, развитая вдоль естественного подруслового талика ручья Поисковый, по которой происходит основной подземный сток из водохранилища (показан стрелкой).

В коренных породах левого берега отчетливее проявляется субмеридиональная структура низкого сопротивления, которая также видна на карте УЭС по глубине 10 м (рис. 2б). На правом берегу, в правобережном примыкании по характерным формам изолиний УЭС в виде уступа отмечается область пересечения продольного бортового разлома и поперечного тектонического нарушения, ориентированного вдоль оси плотины. Этот поперечный разлом прослеживается и в естественном обнажении на правобережном примыкании.

На основе анализа карт УЭС была построена схема интерпретации электроразведочных данных (рис. 3). На схеме показаны границы распространения многолетнемёрзлых пород (ММП) и пути фильтрации воды через плотину. По геоморфологическим и геофизическим признакам выделены тектонические нарушения, по которым предполагается развитие таликов гидрогенного типа.

Анализ результатов геофизических исследований показал, что главным путём фильтрации воды из водохранилища является естественный подрусловой талик ручья Поисковый. Русло ручья расположено в зоне мощного тектонического разлома с активным гидрогеологическим режимом, что проявляется в формировании серии крупных наледей в долине ручья ниже плотины.

В результате трёхмерной инверсии данных ЭТ построено распределение УЭС по объёму геологической среды (рис. 4). В объёме выделена изоповерхность УЭС пород, равная 1500 Ом·м. Она наглядно отображает область отепляющего влияния поверхностных вод водохранилища и подземных трещинно-жильных вод на многолетнемерзлую толщу.



Рисунок 3. Схема интерпретации геофизических данных: 1 – границы распространения ММП; 2 – разломы; 3 – пути фильтрации подземных вод через плотину; 4 – место выхода подземных вод на поверхность.

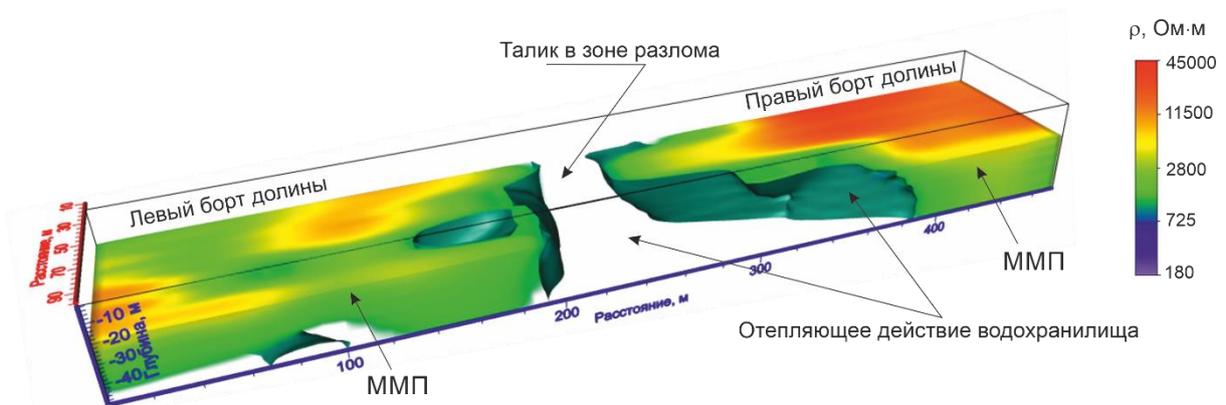


Рисунок 4. Трехмерное распределение УЭС по объему геологической среды. Показана изоповрхность УЭС 1500 Ом·м.

Выводы

На основании анализа карт распределения УЭС пород выделены аномальные области пониженных УЭС, интерпретируемые как таликовые зоны. Таким аномалиям УЭС на глубине 4 м соответствуют участки просадки грунтов на поверхности.

На глубине 10 м области пониженного УЭС носят локальный характер. Установлено, что через тело плотины проходит два фильтрационных потока, объединяющихся в один в нижнем бьефе.

В основании плотины на глубине 20 м со стороны верхнего бьефа в центральной части и правобережном примыкании породы обладают сопротивлением менее 500 Ом·м, что говорит об их талом состоянии. Аналогичная область низких УЭС выделяется и в нижнем бьефе и соответствует русловому талику руч. Поисковый. Эти области соединены через тело плотины

узкой перемычкой низкого сопротивления, что дает основание полагать об их гидравлической связи.

Геофизические данные подтверждают представление о том, что в основании плотины в центральной части по коренным породам проходит мощная разломная зона, по которой осуществляется фильтрация трещинно-жильных вод. Поскольку дно водохранилища не гидроизолировано, то существует связь поверхностных вод водохранилища и подземных вод зоны разлома. Постоянная фильтрация подземных вод в основании насыпи привела к растеплению мерзлого основания и образованию талика гидрогенного типа в теле плотины.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Проекта ФНИ № 0331-2019-0007.

Библиография

1. Великин, С.А. [2013] Возможности использования геофизических методов при изучении состояния гидротехнического сооружения в криолитозоне на примере накопителя минерализованных вод Тымтайдах. *Инженерные изыскания*, **9**, 52-59.
2. Желтенкова, Н. В., Кошурников, А. В., Гагарин, В. Е., Гунар, А. Ю., Скосарь, В. В., Трушников, Я. О., Набиев, И. А. [2018] Определение зон фильтраций в грунтовых плотинах методом электромагнитного зондирования. *Анализ, прогноз и управление природными рисками с учетом глобального изменения климата «Геориск-2018»*, 48-52.
3. Изменение N 1 к СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов [2018].
4. Колесников, В.П., Коноплев, А. В., Пригара, А. М., Татаркин, А. В. [2012] Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий для диагностики состояния гидротехнических сооружений. *Современные проблемы науки и образования*. **6**. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7839> (дата обращения: 28.01.2020).
5. Мазуренко, М.В., Дроздов, А.В., Панин, Г.Л. [2016] Применение электротомографии при исследовании состояния плотин в различных климатических условиях *12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016*. European Association of Geoscientists & Engineers, T08 (Тезисы).
6. Чжан, Р. В. [2014] Геокриологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата. *Фундаментальные исследования*, **9**(2), 288-296.
7. Lin, C. P., Hung, Y. C., Yu, Z. H., & Wu, P. L. [2013] Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. *Journal of GeoEngineering*, **8**(2), 61-70.
8. Loperte, A., Soldovieri, F., & Lapenna, V. [2015] Monte Cotugno dam monitoring by the electrical resistivity tomography. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **8**(11), 5346-5351.
9. Michalis, P., Sentenac, P., Macbrayne, D., & Horizons, S. W. [2016] Geophysical assessment of dam infrastructure: The mugdock reservoir dam case study. In *Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM)*, Vienna, Austria (Vol. 30).

References

1. Velikin, S.A. [2013] Vozmozhnosti ispol'zovaniya geofizicheskikh metodov pri izuchenii sostoyaniya gidrotekhnicheskogo sooruzheniya v kriolitozone na primere nakopitelya mineralizovannykh vod Tymtaydakh. *Inzhenernyye izyskaniya*, **9**, 52-59.
2. Zheltenkova, N. V., Koshurnikov, A. V., Gagarin, V. Ye., Gunar, A. YU., Skosar', V. V., Trushnikov, YA. O., Nabyev, I. A. [2018] Opredeleniye zon fil'tratsiy v gruntovykh plotinakh

metodom elektromagnitnogo zondirovaniya. *Analiz, prognoz i upravleniye prirodnyimi riskami s uchetom global'nogo izmeneniya klimata «Georisk-2018»*, 48-52.

3. Izmeneniye N 1 k SP 39.13330.2012 Plotiny iz gruntovykh materialov [2018].
4. Kolesnikov, V.P., Konoplev, A. V., Prigara, A. M., Tatarin, A. V. [2012] Tekhnologiya kompleksnykh inzhenerno-geofizicheskikh izyskaniy dlya diagnostiki sostoyaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. **6**. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7839> (data 28.01.2020).
5. Mazurenko, M.V., Drozdov, A.V., Panin, G.L. [2016] Primeneniye elektrotomografii pri issledovanii sostoyaniya plotin v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh 12th Conference and Exhibition Engineering Geophysics 2016. European Association of Geoscientists & Engineers, T08 (Abstract).
6. Chzhan, R. V. [2014] Geokriologicheskkiye printsipy raboty gruntovykh plotin v kriolitozone v usloviyakh menyayushchegosya klimata. *Fundamental'nyye issledovaniya*, **9**(2), 288-296.
7. Lin, C. P., Hung, Y. C., Yu, Z. H., & Wu, P. L. [2013] Investigation of abnormal seepages in an earth dam using resistivity tomography. *Journal of GeoEngineering*, **8**(2), 61-70.
8. Loperte, A., Soldovieri, F., & Lapenna, V. [2015] Monte Cotugno dam monitoring by the electrical resistivity tomography. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, **8**(11), 5346-5351.
9. Michalis, P., Sentenac, P., Macbrayne, D., & Horizons, S. W. [2016] Geophysical assessment of dam infrastructure: The mugdock reservoir dam case study. *Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Vienna, Austria* (Vol. 30).