

УДК 550.837.

И.Н. Модин¹, И.А. Аржанцева², М.А. Андреев³, С.А. Акуленко⁴, М.Я. Кац⁵

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОСТРОВЕ ПОР-БАЖЫН В РЕСПУБЛИКЕ ТЫВА

Выполнены комплексные геофизические исследования с целью обследования сохранности археологического памятника «Крепость Пор-Бажын», расположенного на высоте 1300 м на острове посередине оз. Тере-Холь в юго-восточной части Тывы. Установлено, что памятник покоится на многолетнемерзлых породах, которые подвержены отепляющему воздействию озера. Электрические зондирования, выполненные на акватории озера, показали, что ранее остров был частью суши, примыкая вместе с другими участками к южному берегу озера. С помощью глубинных электрических зондирований установлено, что глубина Терехольской впадины превышает 400 м, а нижняя граница мерзлоты расположена на глубине около 170 м.

Ключевые слова: вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), крепость Пор-Бажын, электротомография, непрерывное акваторное зондирование (НАЗ), многолетнемерзлые породы, палеогеографическая реконструкция.

Geophysical researches for the inspection of safety of an archaeological site «The Fortress Por-Bajin», located on island in the middle of lake Tere-Hol in a southeast part of Tuva, have been executed. It is established, that the monument is based on permafrost which are warmed by lake influence. The executed electrical soundings demonstrated, in the past times the island was a land part, adjoining together with other islands to southern coast of lake. It is established by means of deep electrical soundings, depth of the Terehol depression exceeds 400 m, and the bottom of permafrost is located on depth about 170 m.

Key words: vertical electrical sounding, a fortress Por-Bajin, electrical tomography, continuous aqua sounding (CAS), permafrost, paleogeographic reconstruction.

Общая характеристика объекта и задачи геофизических исследований. В 2007–2008 гг. культурный фонд «Крепость Пор-Бажын» предпринял беспрецедентные по масштабам археологические раскопки памятника VIII в. н.э., который в настоящее время находится под угрозой исчезновения. Общая площадь исследований составила около 2 га. В этом проекте участвовали археологи, реставраторы, архитекторы, почвоведы, геоморфологи, геофизики и другие специалисты, связанные с археологией и историей, всего около 1000 человек.

Пять российских университетов и три зарубежных (Швейцария, Великобритания) направили на оз. Тере-Холь свыше 500 студентов-волонтеров. Объект исследования находится в одном из самых труднодоступных мест России, в 250 км на юго-восток от г. Кызыл, в верховьях р. Енисей (рис. 1). Геофизические работы выполнены в основном в рамках учебно-научной практики студентов-геофизиков 3-го курса в июне 2007 г. под руководством 4 преподавателей и 5 аспирантов. Кроме того, в работах принимали участие сотрудники фирмы «Геотехнология», которые провели магнитную съемку острова, и фирмы «Нав-

геоком», которые выполнили лазерное сканирование и построили трехмерную модель поверхности острова (рис. 2).

Крепость Пор-Бажын расположена на одноименном острове, который находится в юго-западной части оз. Тере-Холь. Абсолютная высота уреза воды в озере соответствует отметке 1298 м над уровнем моря. Количество осадков, выпадающих зимой, очень небольшое — около 9 мм. Средняя годовая температура составляет $-2,8$ °С. По берегам оз. Тере-Холь лес не растет, поэтому при скудном травяном покрове такие условия вызывают активное развитие мерзлотных процессов. Поскольку крепость находится на острове, вопрос о динамике границы талых и мерзлых пород приобрел первостепенное значение. Каковы общая мощность мерзлоты, ее состояние на острове, направление развития мерзлотных процессов и оценка влияния отепляющего воздействия озера на остров, их влияние на сохранность памятника — это первый круг вопросов, на которые нам нужно было ответить. Другие важные вопросы связаны со строением Терехольской котловины в целом. Ни глубокого бурения, ни специальных геофизических наблюдений,

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, доцент, канд. геол.-минер. н., *e-mail:* imodin@yandex.ru

² Институт этнологии, канд. ист. н., *e-mail:* arzhantseva@rambler.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, аспирант, *e-mail:* a.mikant@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геофизических методов исследования земной коры, инженер, *e-mail:* sv-ak@yandex.ru

⁵ ЗАО «НПЦ Геотехнология», директор, *e-mail:* mkatsster@gmail.com

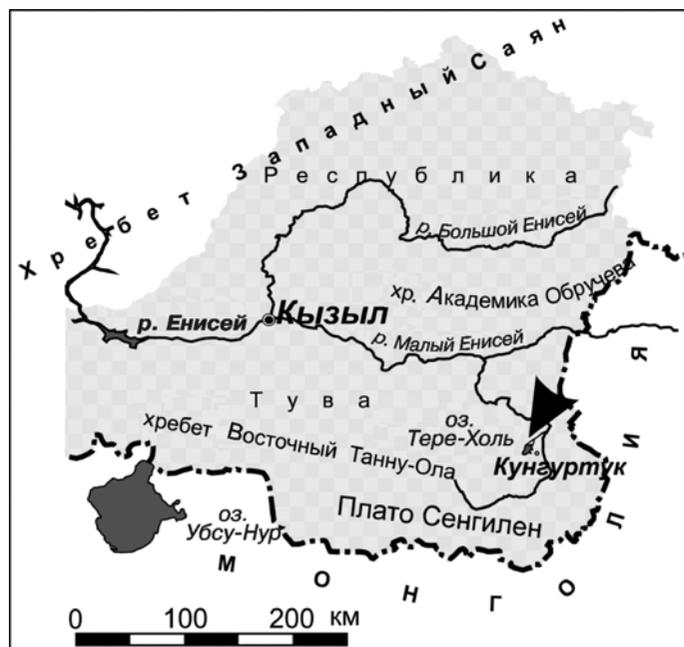


Рис. 1. Схема расположения оз. Тере-Холь

направленных на решение этой проблемы, не было. Поэтому на разрезах в центре котловины условно нанесена кровля кристаллического фундамента на глубине ~150 м. И наконец, третий круг вопросов связан со строением верхней части разреза озерных отложений, из которых мог сформироваться островной архипелаг. При этом из 20 островов, зафиксированных в центральной и южной частях острова на топографической карте 1972 г., 4 самых небольших острова размером 100–150 м к настоящему моменту исчезли, 2 острова соединились с берегом, 2 острова, расположенные в самом центре озера, соединились в один остров. Берега озера очень пологие, и, учитывая, что средняя глубина озера составляет 0,5 м, даже небольшие колебания уровня воды в озере способны привести к значительным изменениям в географическом облике всей местности. Поэтому возникает вопрос, очень важный с точки зрения назначения всего этого архитектурного ансамбля: как производилось строительство крепости — на острове, полуострове или на суше?

До сих пор до конца не выяснена цель строительства такого грандиозного сооружения, которое находится в центре оз. Тере-Холь. В настоящее время большинство специалистов склоняются к тому, что памятник выполнял несколько функций: летняя резиденция уйгурского кагана или его правителя, религиозный центр, крепость и город-ключ, указывающий на положение могилы кагана или его жены. Практически все специалисты сходятся в том, что крепость функционировала недолго, примерно в течение 50 лет. За это время не сформировался значительный культурный слой, люди жили в крепости временно в течение небольших периодов. Погибла крепость в результате сильного пожара, который за-

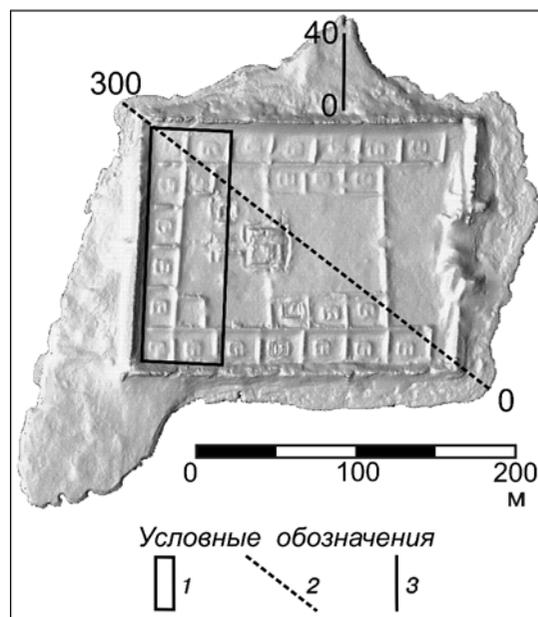


Рис. 2. Трехмерная топографическая модель о-ва Пор-Бажын: 1 — фрагмент участка съемки срединного градиента; 2 — профиль вертикальных электрических зондирований; 3 — профиль электротомографии

фиксирован геофизическими методами и раскопками. Постепенное разрушение стен происходило под действием сильных землетрясений (местность находится в условиях 8-балльной сейсмической активности по шкале Рихтера) и деформации мерзлых пород, которые занимают практически всю территорию острова. Усугубил общую негативную тенденцию изменяющийся во времени уровень воды в озере: время от времени остров соединялся с сушей или был изолирован от земли километровой водной акваторией.

Отметим, что основания всех архитектурных элементов сохранились достаточно хорошо. Северная и западная крепостные стены до сих пор возвышаются до высоты 8–10 м. Южная и восточная части крепостной стены наполовину разрушены, но их общая конфигурация и положение прекрасно обозначены на местности. Уверенно определяется внутренняя планировка крепости как система дворов, в центрах которых находились жилые постройки. Поскольку архитектурно-строительные проблемы были очевидны, основная цель геофизических исследований состояла в выяснении природных условий происхождения острова, на котором расположена крепость, и оценке общего геологического состояния территории памятника и окружающего озера с точки зрения перспектив его сохранения.

Оценка мерзлотно-геологических условий по геофизическим данным. Для решения этой задачи на острове по двум диагональным профилям выполнены вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) с трехэлектродной установкой Шлюмберже (максимальный разнос АО составил 50 м), электропрофилеирование методом срединного градиента в двух поляризациях, георадиолокационные зон-

дирования и электротомографические исследования.

Георадарные исследования зафиксировали четкие отражающие границы от кровли мерзлых пород. Данные, полученные методом ВЭЗ, показали, что на суше и островах под талым слоем находятся мерзлые породы (рис. 3). По результатам бурения на воду, которое производилось в лагере, установлено, что весь разрез вплоть до глубины 67 м является мерзлым. По данным ВЭЗ мерзлота имеет сложное строение. Глубина ее верхней кромки изменяется от 1,5 до 3,5 м. В ряде случаев мы наблюдали внутренние области талых пород. По геофизическим данным мерзлота под озером отсутствует.

Между сушей и озером наблюдаются так называемые мерзлые карнизы. Под берегами островов могут быть талые карманы, которые, по нашему мнению, проникают на расстояние 10–15 м в глубь островов. Обычные электрические зондирования выполнены на акватории озера с мостов. Результаты показали, что юго-восточная часть озера имеет трехслойное строение. Сверху расположен слой воды вместе с неконсолидированными илами, ниже залегает слой глин и илов мощностью несколько метров, на глубине до 8–10 м — слой песков, который подстилается тоже слоем глин. Таким образом, мерзлые породы на акватории озера не обнаружены.

Исследования методом срединного градиента выполнены на внутренней территории крепости. При этом в каждой точке проводились измерения в двух поляризациях электрического поля. Из двух значений поля, полученных в каждой точке, после процесса обработки данных находили среднее. Таким образом, на результирующих картах проявились объекты с разной проводимостью и разным направлением. Сделаны следующие выводы. Центр острова в районе дворцовой постройки за счет низкой температуры мерзлых пород характеризуется максимальными значениями сопротивления грунтов (рис. 4). Остров имеет прямоугольную форму, поэтому угловые башни крепости сильно выдвинуты в сторону озера, в результате они подверглись максимальному растеплению. По швам, которые отсекают углы острова, происходит опускание поверхности земли. При этом образование таких форм усугублялось сильными землетрясениями. За счет деградации мерзлоты и землетрясений разные части крепости пострадали по-разному. Наилучшее состояние наблюдается у северных стен. Высота северных стен достигает 8–10 м. Только самая восточная и западная части этой стены подверглись разрушению.

Электротомографические работы показали, что в зависимости от состояния мерзлых грунтов наблюдается различное состояние археологических объектов. На рис. 5 показан результат геологиче-

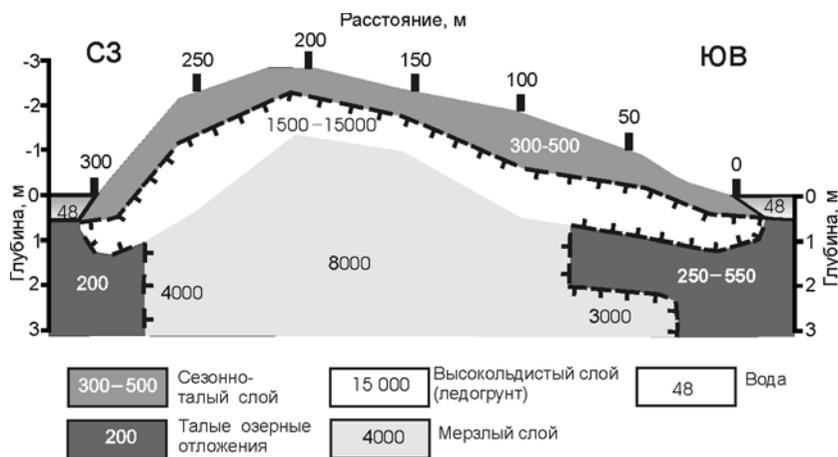


Рис. 3. Геоэлектрический разрез о-ва Пор-Бажын по результатам вертикальных электрических зондирований вдоль диагонального профиля СЗ–ЮВ. Цифры на профиле — удельное сопротивление, Ом·м

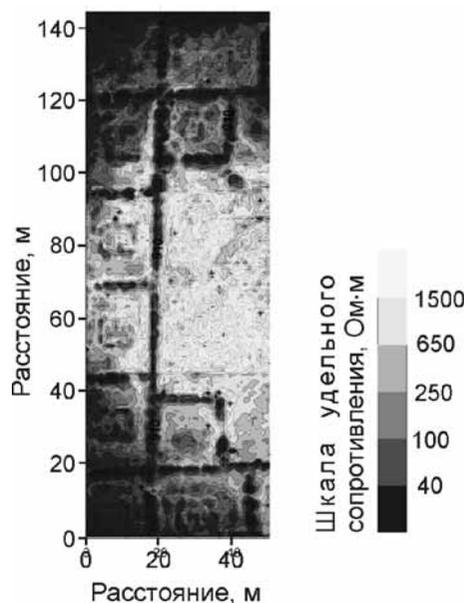


Рис. 4. Фрагмент карты аномального кажущегося сопротивления срединного градиента внутри крепости вдоль западной оборонительной стены (положение участка см. на рис. 2)

ской интерпретации данных электротомографии по профилю, расположенному с внешней стороны северной оборонительной стены. Высокольдистый слой мерзлых пород активно «подпирает» основание оборонительной стены. Здесь наблюдается наиболее сохранившийся участок стены. Южная стена, подверженная наибольшему растеплению за счет солнечной радиации и приближенности к береговой линии, наоборот, самая разрушенная. Таким образом, разрушение стен происходило под действием растепления грунтов, которое деформирует поверхность земли и приводит к трещинообразованию в древних строительных конструкциях.

Зондирование верхней части разреза оз. Тере-Холь. Согласно древним легендам, озеро возникло внезапно и имеет искусственное происхождение [Вайнштейн, 1964]. Однако первые же обзорные маршруты и зна-

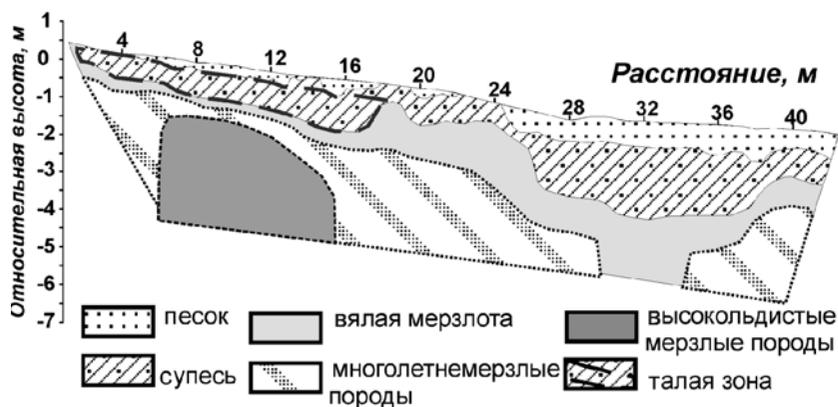


Рис. 5. Результаты электротомографии на профиле с северной стороны крепости

комство с геологическим строением Терехольской впадины показало, что межгорная депрессия существует с плиоцена, имеет значительную мощность накопленных озерно-речных отложений (несколько сотен метров). Сравнительный анализ космических снимков и топографических карт, полученных за последние 40 лет, показал, что акватория озера постоянно испытывает расширение и сокращение, и эти процессы могут взаимно меняться в течение сравнительно короткого времени, соизмеримого с жизнью одного человека. Например, в 1891 г. оз. Тере-Холь посетил известный исследователь Сибири и Монголии Д.А. Клеменц, который зафиксировал, что о. Пор-Бажын и о. Промежуточный, который в настоящий момент находится в 300 м на восток от крепости, были одним островом, а береговая линия озера находилась всего в 200 м от этого острова [Клеменц, 1895]. В этот момент наблюдался минимум уровня воды в озере. В начале 30-х гг. прошлого столетия здесь побывал П. Маслов, который отметил, что воды оз. Тере-Холь подходят к стенам крепости Пор-Бажын [Маслов, 1933]. Граница повышения уровня воды, которая наблюдалась в середине XX в., до сих пор хорошо просматривается в контурах последней террасы. А пространство, еще недавно залитое водой, четко отмечается на космическом снимке в виде заболоченной поймы с активно развитой кустарниковой растительностью и мелкими озерами. Местами ширина этой поймы составляет 500 м.

Вертикальные электрические зондирования на акватории проводились с помощью специальной плавающей косы длиной 76 м с шагом от 1 до 10 м,

что обеспечивало глубину исследования не менее 10 м. Работы осуществляли с помощью надувной лодки. На головной лодке устанавливали GPS-приемник, который фиксировал положение начала косы, а положение хвоста косы, ее середины и соответственно точки записи рассчитывались в зависимости от скорости и траектории хода лодки. Для выполнения ВЭЗ использована инверсная установка $M_8...M_1ABN_1...N_8$, в которой выполнена замена положения питающих и приемных электродов. При использовании многоканального измерителя это дало большое преимущество: за очень короткий времен-

ной интервал получаем полную кривую вертикального электрического зондирования. Такая технология съемки называется непрерывными акваторными зондированиями (НАЗ) [Бобачев и др., 2006].

Отметим, что при значительном накоплении полезного сигнала качество полевых материалов получилось очень высоким. Это позволило при интерпретации кривых ВЭЗ на компьютере методом подбора добиться совпадения полевых кривых с экспериментальными с точностью около 1,0%. Это увеличило точность определения параметров геоэлектрического разреза до 10%.

Судя по полученным данным, заполнение озерной депрессии происходило в несколько этапов. Понижение кровли песков прослеживается на глубину до 20–25 м. При этом прогибание ложа приводило к заполнению депрессии все более глинистыми осадками (рис. 6).

Результаты электрических зондирований позволяют с определенной долей уверенности утверждать, что во время строительства крепости открытая водная поверхность озера находилась только в западной части современной акватории оз. Тере-Холь (рис. 7). При этом крепость была расположена на западном мысу большого полуострова, площадь которого составляла около 3 км², этот полуостров примыкал к южному берегу озера. В северо-восточной части озера в это время, вероятно, существовала акватория, которая соединялась проливом с юго-западной частью озера.

Строение Терехольской впадины. Для изучения разреза Терехольской впадины нами выполнены ВЭЗ с разномом АВ/2500 м. Профиль наблюдений прохо-

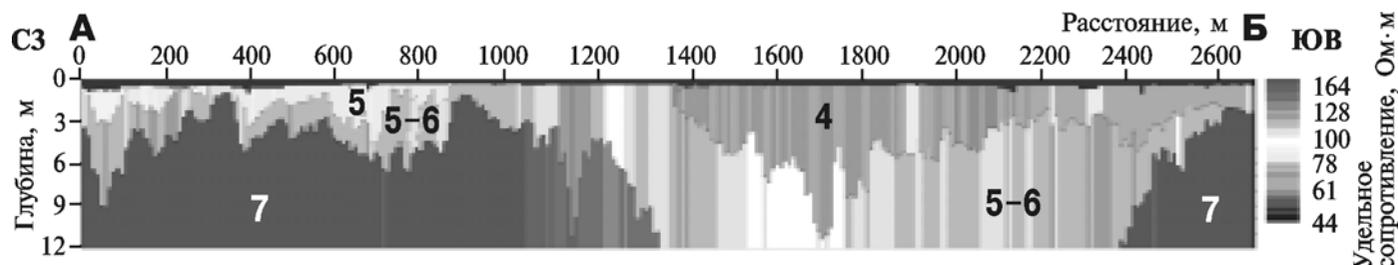


Рис. 6. Результаты интерпретации электрических зондирований по профилю 5. Электрофизические литотипы — цифры на профиле: 4 — глинистые пески (50–80 Ом·м), 5–6 — средне- и слабоглинистые пески (80–150 Ом·м), 7 — сортированные пески (150–200 Ом·м)

дил от о. Промежуточный через озеро с использованием построенного в 2007 г. 800-метрового деревянного моста поперек долины. Результаты интерпретации ВЭЗ показаны на рис. 8. Как видим из приведенного примера, общая глубина зондирования составила более 300 м. На этой глубине в правом борту долины выявлен слой предположительно гранитоидов, которые постепенно погружаются к центру долины. По данным метода зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ), выполненного сотрудниками кафедры мерзлотоведения со льда озера в 2008 г., в центре озера глубина гранитоидного кристаллического фундамента достигает 700 м. Тело Терехольской впадины заполнено терригенно-осадочными породами. Центральная часть сложена в основном суглинистым и супесчаным материалом. Периферийные части, тяготеющие к берегам, выполнены более грубообломочными терригенными отложениями. Под акваторией озера залегают породы, имеющие сравнительно низкое сопротивление, а берега и острова сложены вечномерзлыми породами до глубины ~170 м. Мерзлота в пределах о. Промежуточный распространяется на глубину не более 50 м. Мощность мерзлой толщи в прибрежной части постепенно изменяется от озера к периферии долины от 50 до 150 м. При этом в межгорной долине на самом юге профиля наблюдается сквозной талик. Слой мерзлых пород можно условно разделить на два горизонта. Верхний горизонт до глубины 50 м имеет высокие значения сопротивления (2000–5000 Ом·м). Нижняя часть мерзлых пород состоит из более растепленного слоя с сопротивлением от 1000 до 1500 Ом·м. Итак, можно сделать вывод о распространении многолетнемерзлых пород до глубины около 150 м, что свидетельствует о значительном времени существования мерзлоты в

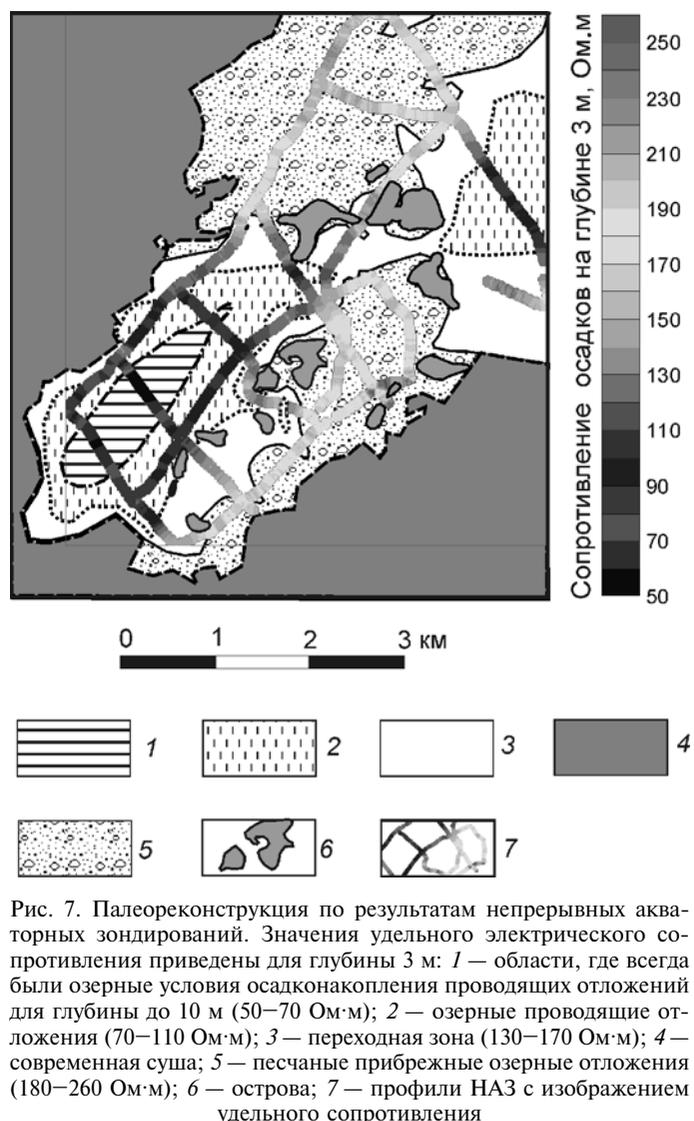


Рис. 7. Палеорекострукция по результатам непрерывных акваторных зондирований. Значения удельного электрического сопротивления приведены для глубины 3 м: 1 — области, где всегда были озерные условия осадконакопления проводящих отложений для глубины до 10 м (50–70 Ом·м); 2 — озерные проводящие отложения (70–110 Ом·м); 3 — переходная зона (130–170 Ом·м); 4 — современная суша; 5 — песчаные прибрежные озерные отложения (180–260 Ом·м); 6 — острова; 7 — профили НАЗ с изображением удельного сопротивления

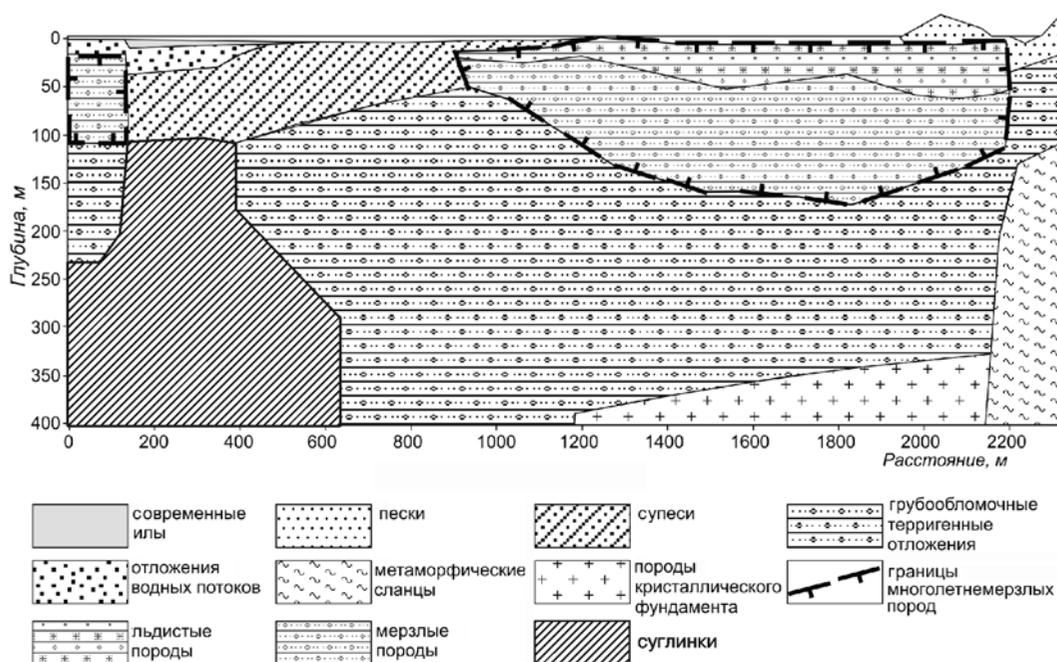


Рис. 8. Геолого-геофизический разрез по результатам электрического зондирования через Терехольскую впадину

этом районе. Теперь нет сомнений в том, что строительство крепости Пор-Бажын производилось на мерзлых грунтах.

Выводы. 1. Крепость Пор-Бажын находится на мерзлом острове, который постепенно разрушается за счет тепляющего воздействия оз. Тере-Холь.

2. По результатам геофизических исследований можно утверждать, что в момент строительства кре-

пость находилась на большом полуострове общей площадью около 3 км², который примыкал к южному берегу оз. Тере-Холь.

3. Общая глубина Терехольской впадины составляет, по нашим оценкам, не менее 400–500 м в центральной части долины, мерзлые породы распространены до глубины не менее 150 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андреев М.А., Большаков Д.К., Комаров О.И., Модин И.Н. Электрометрические исследования на переходах трасс проектируемых трубопроводов через водные преграды методом ННБ // Трубопроводный транспорт. 2009. № 2. С. 23–25.

Бобачев А.А., Зайцев Д.А., Модин И.Н., Яковлев А.Г. Электрометрические исследования на территории хвостохранилища горно-обогатительного комбината // Разведка и охрана недр. 2006. № 12. С. 25–29.

Вайнштейн С.И. Древний Пор-Бажын // Сов. этнография. 1964. № 6. С. 103–114.

Клеменц Д.А. Археологический дневник поездки в Среднюю Монголию в 1881 г. // Сб. трудов Орхонской экспедиции. СПб., 1895.

Маслов П. Конец Урянхая. М.: ОГИЗ Молодая гвардия, 1933.

Электрическое зондирование геологической среды. Ч. I / Под ред. В.К. Хмелевского и В.А. Шевнина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. 175 с.

Поступила в редакцию
25.05.2010