

УДК 551.8:681.33(572.52)

© Е.В. Селезнева, И.К. Лурье, А.В. Панин

Е.В. Селезнева, И.К. Лурье, А.В. Панин

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦИИ ПАЛЕОРЕЛЬЕФА ОСТРОВА ПОР-БАЖЫН

Введение

Восстановление облика древней земной поверхности, называемое палеогеоморфологической реконструкцией, является технически сложным в исполнении, а по результату не всегда однозначным и достоверным, что чаще всего определяется неполнотой доступной информации. Геоморфологические приемы таких реконструкций определяются большим числом факторов, главным среди которых является степень геологической изученности объекта. Использование компьютерных технологий и геоинформационных методов пространственного моделирования позволяет существенно усовершенствовать методику палеореконовструкций. Основой ее становится создание цифровых моделей, как отдельных срезов информации, так и комплексных, в совокупности с данными полевых исследований. Пространственное моделирование позволяет создавать емкие по информативности изображения местности, имитирующие ее изменения во времени и пространстве, что обеспечивает не только возможность визуализации данных, но и оценки свойств местности и находящихся на ней объектов, а также достоверности создаваемых моделей.

Задача разработки эффективной методики палеореконовструкций возникла в связи с исследованиями острова Пор-Бажын (республика Тыва), на котором расположена полуразрушенная постройка средневековой крепости, датируемая примерно 750 г. н.э. [1]. Последние годы специалистами разного профиля, в том числе сотрудниками географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, здесь ведутся активные работы по изучению истории природной среды, сопутствовавшей сооружению крепости, для более полной интерпретации археологического памятника и разработки мер по его охране от неблагоприятных природных воздействий. Разработка методики реконструкции древней поверхности острова с использованием методов пространственного моделирования направлена на повышение достоверности оценки современной ситуации и прогноза ее развития для принятия мер по защите крепости.

Исследования основаны на фактических полевых данных и экспертной информации о формировании рельефа острова, выявлении определяющих факторов рельефообразования.

Остров Пор-Бажын – один из двух десятков островов на озере Тере-Холь. Озеро довольно мелководное (средняя глубина составляет 0,5-0,7 м, а максимальная – 1,5 м). Площадь острова составляет около 6 га, поверхность сложена рыхлыми четвертичными отложениями и покрыта густой травой и кустарником. Изучение физико-географических особенностей региона позволило определить, что проблема разрушения памятника в первую очередь связана с геолого-геоморфологическими и гидролого-климатическими особенностями территории, главными из которых являются сейсмичность региона и распространение здесь вечномёрзлых грунтов.

Методика палеогеоморфологической реконструкции острова Пор-Бажын

В основу моделирования положен принцип изучения площадного распространения геолого-геоморфологических слоев по данным исследований (наблюдений) в отдельных точках, а также вдоль определенных линий. Следует отметить, что из-за невозможности непрерывного прослеживания пластов на всем их протяжении и дискретности распределения точек наблюдения при палеогеографических реконструкциях всегда существует неоднозначность в интерпретации данных.

Основные задачи создания цифровых моделей включали:

- моделирование современного рельефа видимой поверхности острова и восстановление рельефа, погребенного под постройкой крепости;
- моделирование деформаций территории острова, произошедших со времени постройки крепости Пор-Бажын;
- реконструкция палеорельефа поверхности острова до и после возведения на нем крепости.

Исходные данные

В качестве исходных материалов для решения задач пространственного моделирования были использованы:

- обработанные данные лазерного сканирования поверхности острова;
- материалы полевых работ: данные бурения археологических и геоморфологических раскопов, собранные во время экспедиций в 2007-2008 гг.;
- данные дистанционного зондирования (космические снимки, полученные системой QuickBird – мультиспектральный и панхроматический, август 2007 г.);
- литературные источники.

При разработке методики реконструкции палеорельефа были исследованы и оценены наиболее часто применяемые способы построения цифровых моделей, реализованные во многих ГИС-пакетах [3]. Пространственная привязка, построение моделей и их совмещение проводились средствами программных продуктов ArcGIS 9.2 (ESRI, США). Для создания трехмерных моделей местности применялась методика построения растровой поверхности с помощью модуля 3D Analyst.

Лазерная съемка территории острова, первичная обработка исходного «облака» точек съемки, относящихся к земной поверхности, поверхности стен и других сооружений крепости, включая геопривязку данных и отделение сторонних шумов, а также создание топографического плана масштаба 1:200 и триангуляционной модели рельефа (TIN) выполнены специалистами НПП «Навгеоком» в 2007 г.

Построенную TIN-модель наряду с векторизованными на этапе дешифрирования границами стен крепости, береговой линией и границами зон растительности специалисты «Навгеокома» использовали для создания топографического плана масштаба 1:200, оформленного с использованием условных знаков, применяемых для планов М 1:500 и представленного в формате .dxf. Горизонтالي на плане проведены через 0,2 м (в том числе через элементы разрушенных зданий) с утолщением для каждой пятой горизонтали (через 1 м).

Точность исходных данных, полученных в результате лазерного сканирования и их последующей обработки, складывается из целого ряда показателей: точности тахеометра, использованного для проведения съемочного обоснования, точности сканера, погрешностей, вносимых в результате дальнейшей обработки (геопривязка и дешифрирование) [5].

Для моделирования поверхности острова использовалось «прореженное» облако данных лазер-

ного сканирования (средняя плотность 11 точек/м², среднее расстояние между точками – 0,3 м).

В ходе экспедиционных исследований нами проведена фиксация поверхности погребенного рельефа в кернах буровых скважин и археологических раскопах. Главным маркером положения современной естественной поверхности является почвенный слой («погребенная почва»). Эти данные представлены 628 точками наблюдений. Для планово-высотной привязки точек фиксации использовались геодезические приборы производства Leica Geosystems: электронный тахеометр TPS1200 и высокоточный GPS-приемник GPS1200. Точность пространственного положения данных определена точностью GPS (как менее точного из приборов) и составляет 0,02-0,03 м. Единое начало отсчета высот соответствует современному положению уровня оз. Тере-Холь, зафиксированному на июль 2007 г. относительно специально разбитой сети реперов.

Пространственная привязка данных в систему координат UTM для эллипсоида WGS84 и построение моделей осуществлено средствами базовых функций ГИС-пакета ArcGIS 9 (ESRI, США) и его модуля 3D Analyst.

Моделирование реконструкции рельефа острова Пор-Бажын проводилось поэтапно и представляло собой построение цифровых моделей местности и вспомогательных трехмерных поверхностей (рис. 1).

Для обеспечения возможности наложения и анализа моделей и снимков был выбран способ построения сеточно-ячеистых моделей (растровый формат) с пространственным разрешением 0,3 м, что соответствует точности представления данных лазерного сканирования. Для создания ЦМР использован интерполяционный алгоритм естественного соседства Natural Neighbor, реализованный в модуле 3D Analyst. В результате созданы пространственно согласованные модели, представленные в единой системе координат с одинаковым размером ячеек раstra.

Модель современной геотехноморфогенной поверхности (ЦМР ГП), представляющего видимую поверхность «истинного» («антропогенного») рельефа, создана на основе исходных прореженных данных лазерного сканирования (рис. 2). Величина погрешности интерполирования определялась по значениям высот исходных точек, а также отметок высот соответствующих точек полевых геодезических измерений. Отклонения результатов измерений колеблется в пределах 0,1 м, что соответствует точности исходных данных.

Цифровая модель естественного рельефа (ЦМР ЕР), представляющая по большей части

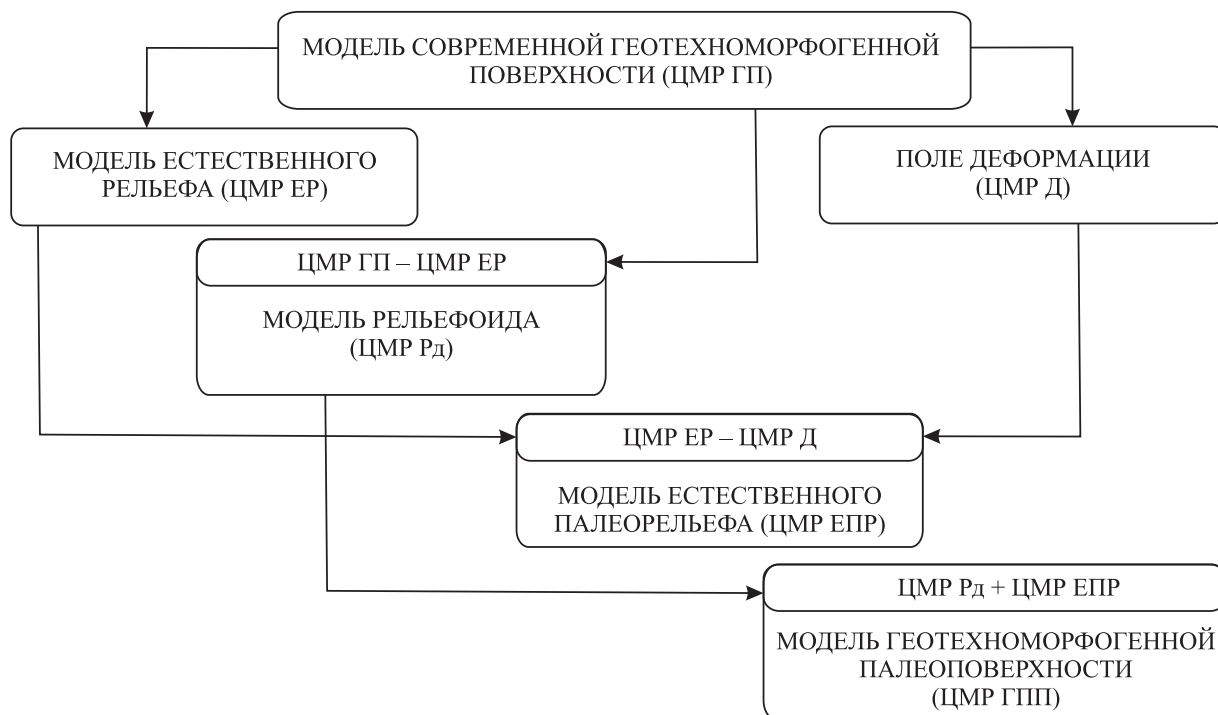


Рис. 1. Последовательность создания моделей и их взаимосвязи

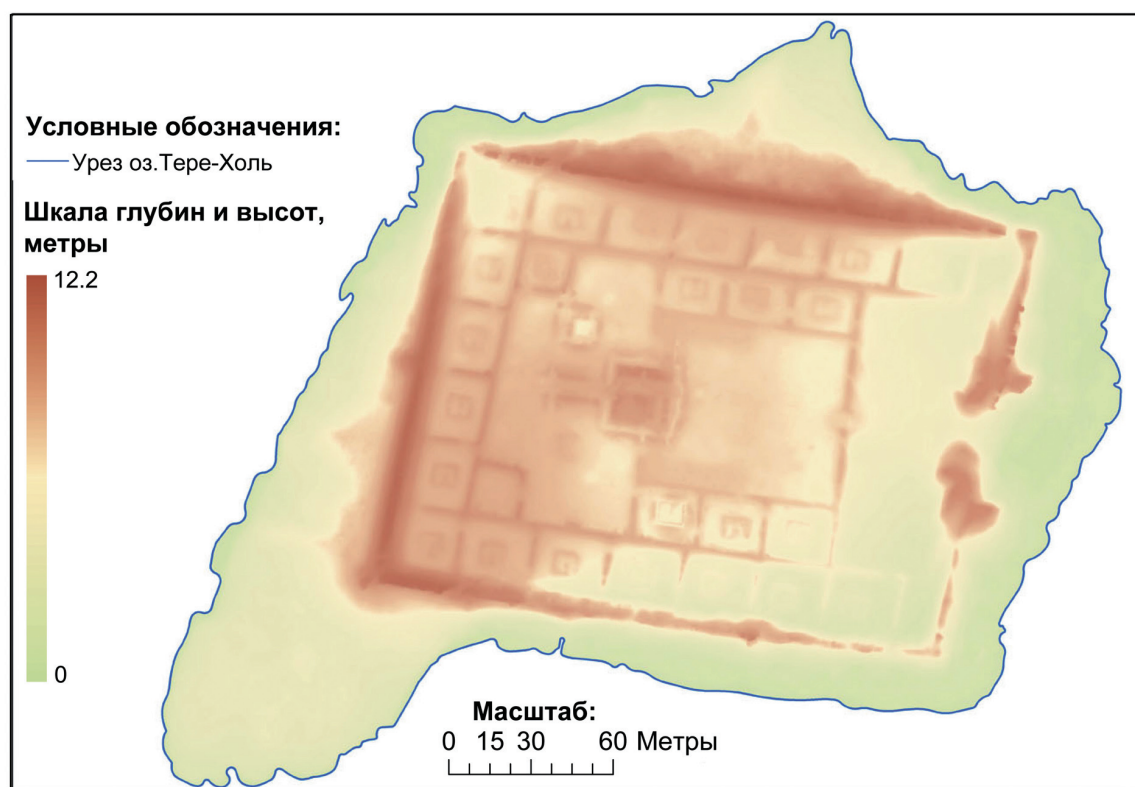


Рис. 2. Модель современной геотехноморфогенной поверхности

рельеф, погребенной под остатками конструкций крепости Пор-Бажын и слоем их разрушения, построена по данным залегания погребенной почвы, полученным путем бурения и в археологических раскопах. Для контроля использовалась построенная цифровая модель современной геотехноморфогенной поверхности.

Моделирование погребенного рельефа в значительной степени является процессом идеализации реальной ситуации, позволяющим лишь отразить основные особенности реального рельефа. Понятие достоверности такой модели может быть обеспечено использованием фактических измеренных данных и экспертных оценок [2]. Построение модели ЦМР ЕР

и дальнейший ее анализ выполнены исходя из предположения, что современный естественный рельеф является пологовыпуклым.

При построении модели поверхности современного естественного рельефа необходимо было задать пространственную границу моделирования. Эта граница оценивалась по положению современных береговых обрывов (в местах размыва береговой линии), а на пологих низменных берегах – по современному урезу воды путем визуального дешифрирования ЦМР ГП, отображенной способом светотеневой отмычки.

Данные бурения были дополнены отметками высот точек, где установлено отсутствия антропогенного слоя – за пределами стен крепости, где поверхность естественного рельефа совпадает с поверхностью рельефа дневной поверхности. Таким образом, общий набор исходных данных для создания ЦМР ЕР составил 2000 точек.

Построенная модель ЦМР ЕР (рис. 3) соответствует представлениям о поверхности естественного рельефа острова как пологовыпуклой с незначительными перепадами высот. Кроме того, под восточной стеной крепости на модели проявляются ложбины. Их положение здесь оправдано общей просадкой стен крепости, что подтверждается результатами изучения траншейных раскопов.

Анализ формы гребней стен позволил выдвинуть предположение об общей просадке поверхности острова. Ранее считалось, что разрушение стен крепости происходило только в результате обвала и разведения материала с их гребней. Однако обнаружилось, что деформации стен пространственно увязаны с формой поверхности острова: там, где она снижается, снижаются и гребни стен, причем некоторые отчетливые уступы рельефа прослеживаются как в поверхности острова, так и в гребневых линиях стен. Применявшиеся технологии строительства предполагают, что изначально все стены имели одинаковую высоту и уровень гребней (так например, считает зам. руководителя археологических работ, старший научный сотрудник Института истории материальной культуры РАН, В.А. Завьялов). Максимальные значения высот стен крепости, определенные по ЦМР ГП путем построения продольных профилей по гребням внешних и внутренних стен с шагом 2 м (рис. 4), совпадают с высокой степенью точности. По-видимому, на этих участках стены остались недоформированными. Эти участки приняты нами за эталоны первоначального уровня гребней стен. На других участках локальные снижения гребней стен происходили в результате просадок стен вместе с участками острова, на которых они располагаются. Причиной этих просадок могли быть сейсмические

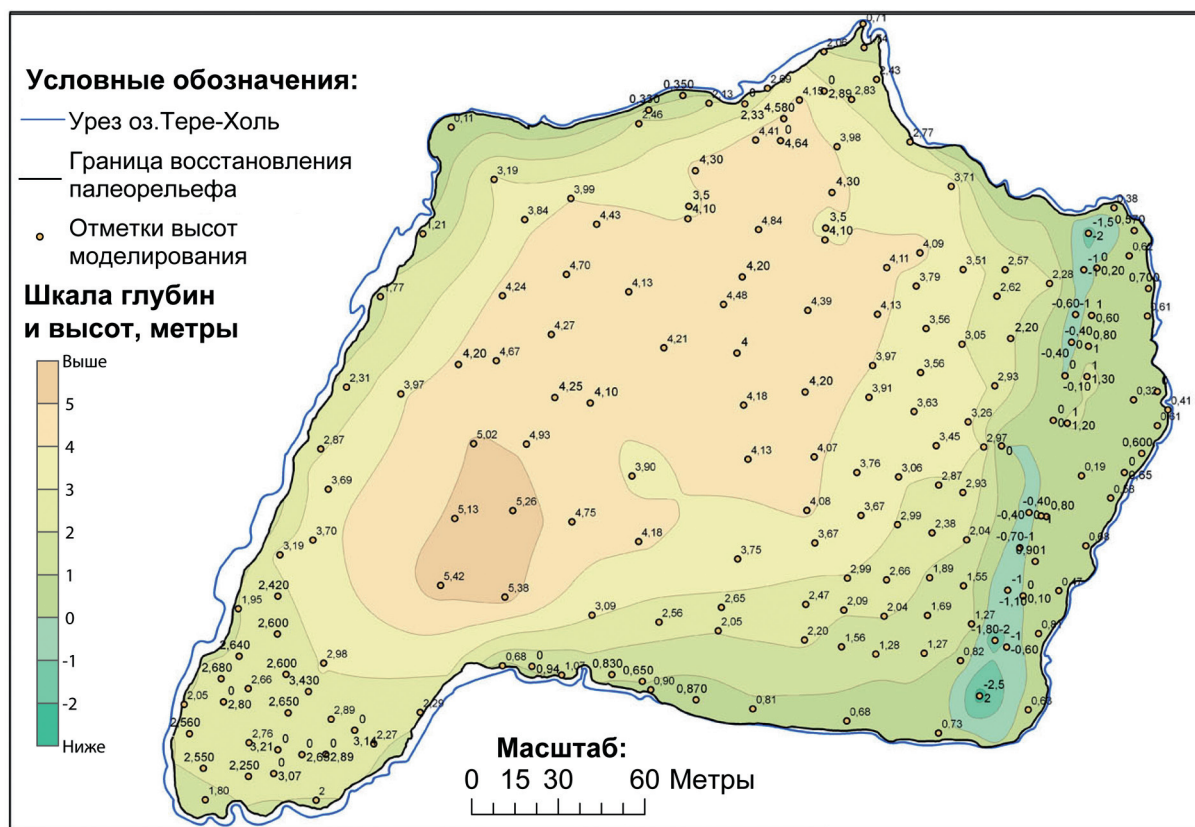


Рис. 3. Модель естественного рельефа

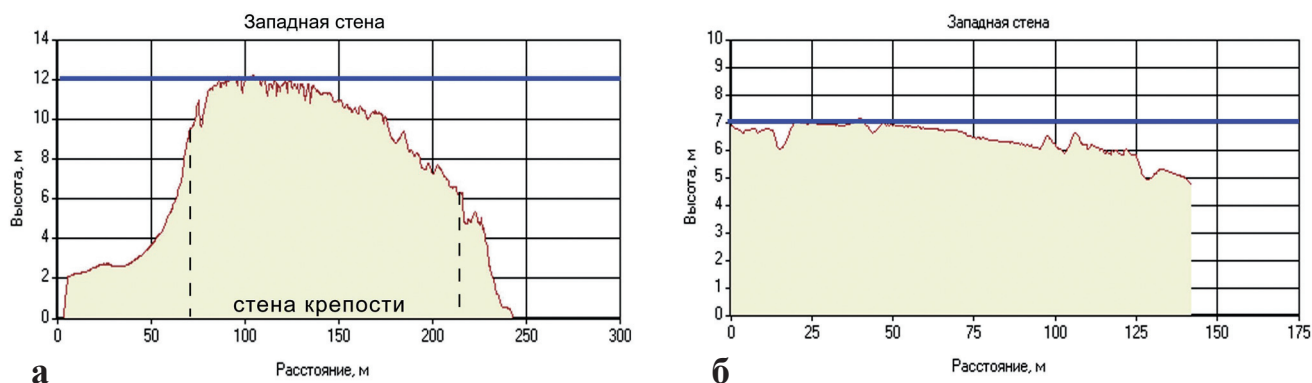


Рис. 4. Продольные профили по гребням стен, построенные по ЦМР ГП:
а – пример профиля внешней стены, б – пример профиля внутренней стены

воздействия – при изучении крепости обнаружены следы нескольких землетрясений [5].

Это предположение легло в основу построения *цифровой модели деформаций* (ЦМР Д) или поля деформаций. Для ее построения использован набор точек, измеренных на продольных профилях, построенных по ЦМР ГП вдоль внешних и внутренних стен крепости. Из этих данных следует, что максимальная высота внешних стен – 12 м, а внутренних – 7 м над уровнем озера. Такие значения и были приняты за высоты стен крепости при ее постройке.

Далее, для каждой измеренной точки была определена величина деформации путем вычитания из значений высоты, снятой с ЦМР ГП, максимального значения высоты стен. По этим данным и была создана цифровая модель деформаций ЦМР Д (рис. 5). Анализ модели показал, что просадки поверхности острова имеют восточный и юго-восточный тренд.

Созданные цифровые модели послужили основанием для восстановления древнего естественного рельефа острова до момента сооружения на острове крепости, построения модели остатков крепости (поверхности антропогенного слоя), а также для палеорекострукции всего археологического памятника (острова и крепости) в пределах границ внешних стен крепости. Методика выполнения этих реконструкций основана на использовании ГИС-технологий наложения (оверлея) уже созданных моделей – по существу сложения или вычитания соответствующих растровых слоев.

При построении *модели естественного палеорельефа острова* (ЦМР ЕПР) предполагалось, что просадки на его древней поверхности, вызванные эндогенным воздействием, отсутствовали. Поэтому модель ЦМР ЕПР, которая представляет естественную древнюю поверхность острова в пределах границ внешних стен крепости на момент отсутствия здесь просадок, получена сложением моделей

естественного рельефа (ЦМР ЕР) и поля деформаций (ЦМР Д) (рис. 6).

Такая реконструкция может быть полезна для интерпретации структуры археологического памятника – уточнения его хозяйственного зонирования, архитектурно-планировочных деталей и т.п.

Путем вычитания из модели внешней оболочки поверхности острова – современного видимого рельефа (ЦМР ГП), модели естественного рельефа (ЦМР ЕР) создана цифровая модель остатков крепости – модель рельефоида (ЦМР Рд), или, по Л.Л. Розанову [4], модель искусственной составляющей рельефа (см. рис 7). Эта поверхность предоставляет информацию об объеме строительных материалов, использованных для сооружения крепости, а участки с отрицательными отметками показывают величину изъятых материалов – древний карьер в западной части острова.

Более детальный морфометрический анализ поверхности позволяет сделать предположение относительно величин просадок самих стен крепости. Здесь необходимо подчеркнуть особенности самой модели (ЦМР Рд), на которые опирается этот исследовательский ход. Для этого стоит обратиться к моменту ее создания. Исходные поверхности для построения ЦМР Рд стали ЦМР ГП и ЦМР ЕР. Обе эти модели отражают современное состояние острова и содержат в себе равные величины произошедших просадок поверхности острова. При вычитании моделей их результирующая (ЦМР Рд) оказывается свободной от просадок, которые взаимоисключились на стадии ее создания.

Таким образом, если построить на этом этапе продольные профили вдоль гребней стен крепости, все они должны выровняться на одной высоте, т.к. исключено влияние деформаций поверхности острова. Однако оказалось, что это не так (рис. 8а, 8б). Высоты отметок гребней стен по-прежнему

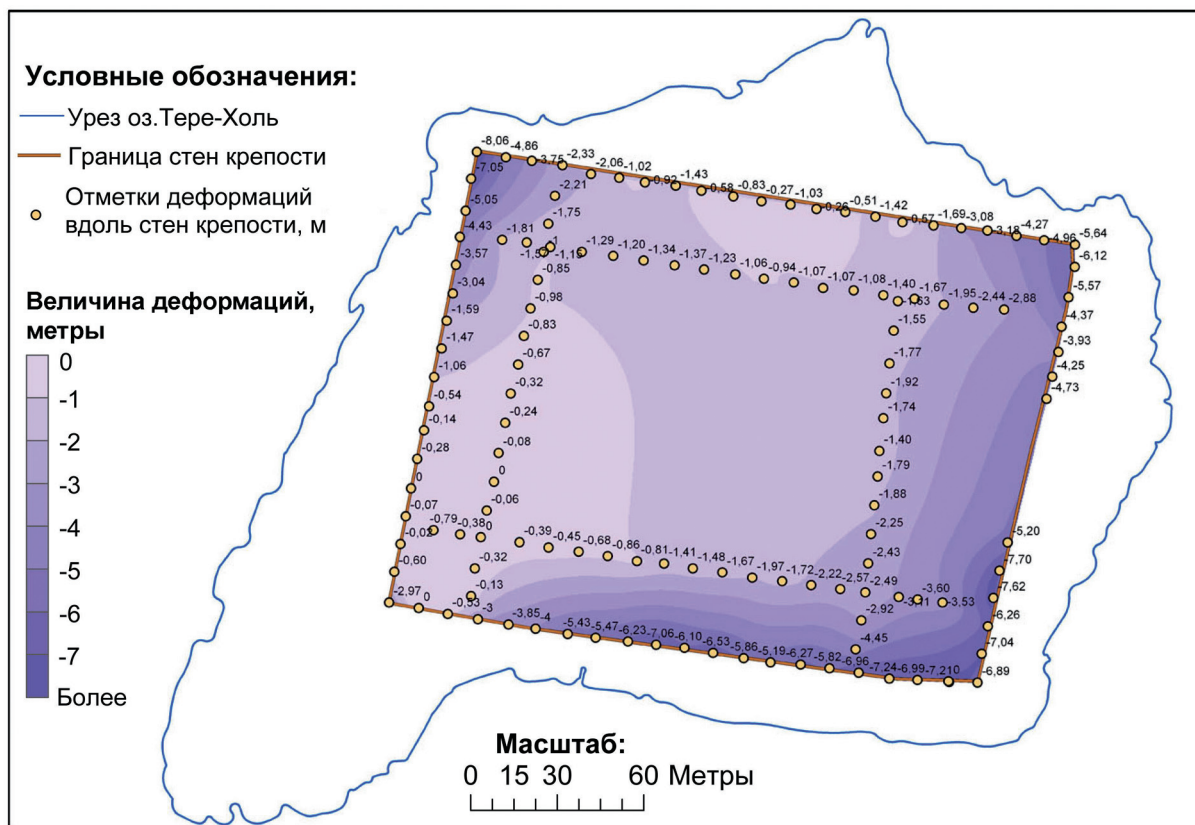


Рис. 5. Поверхность поля деформаций

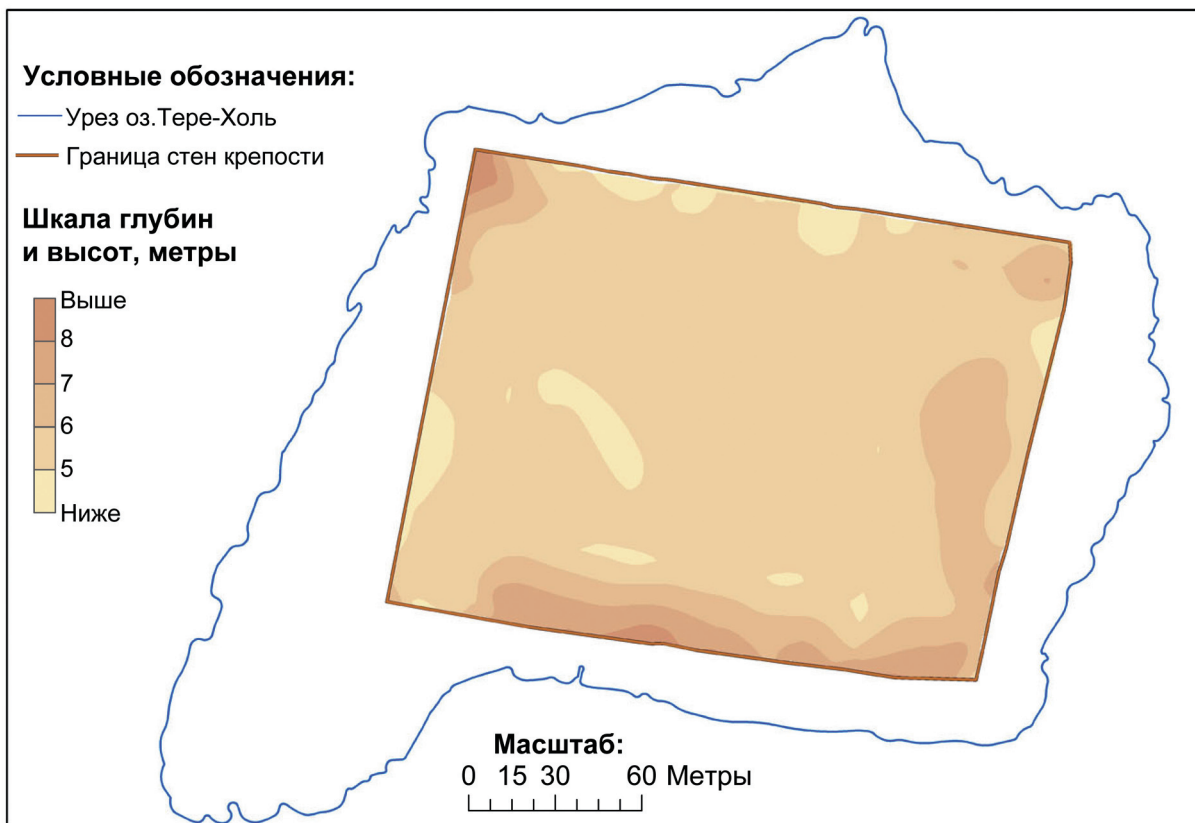


Рис. 6. Модель естественного палеорельефа

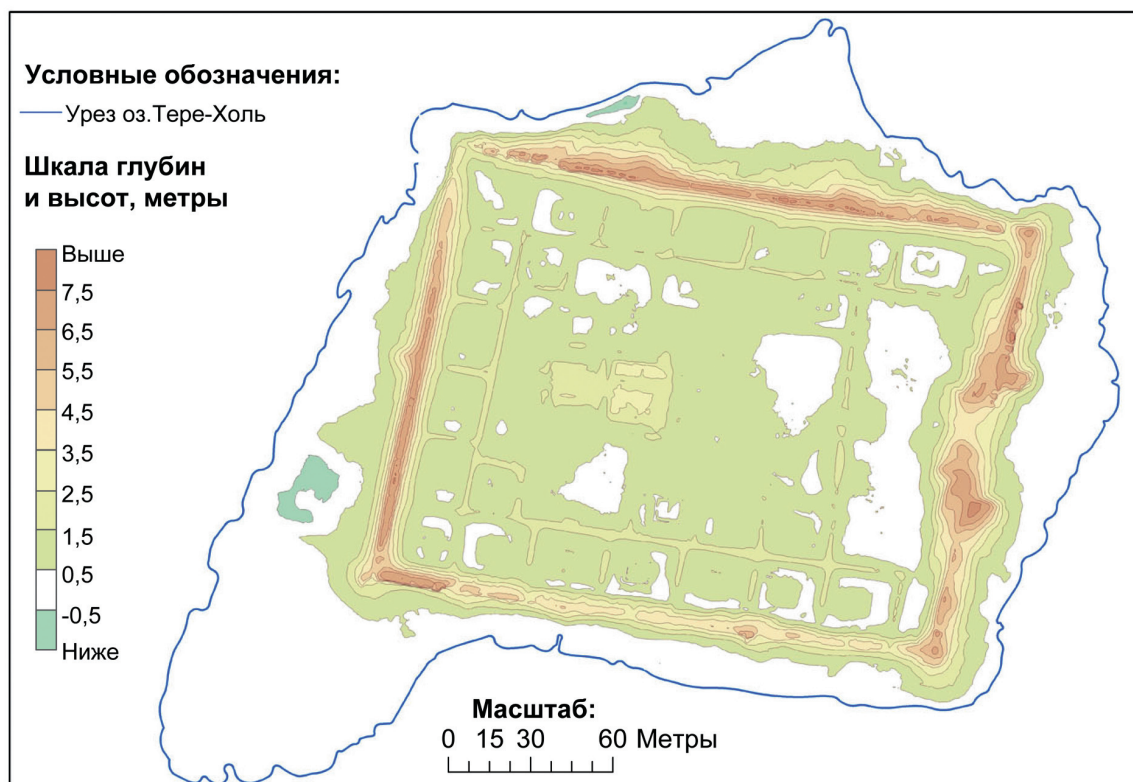


Рис. 7. Модель рельефоида

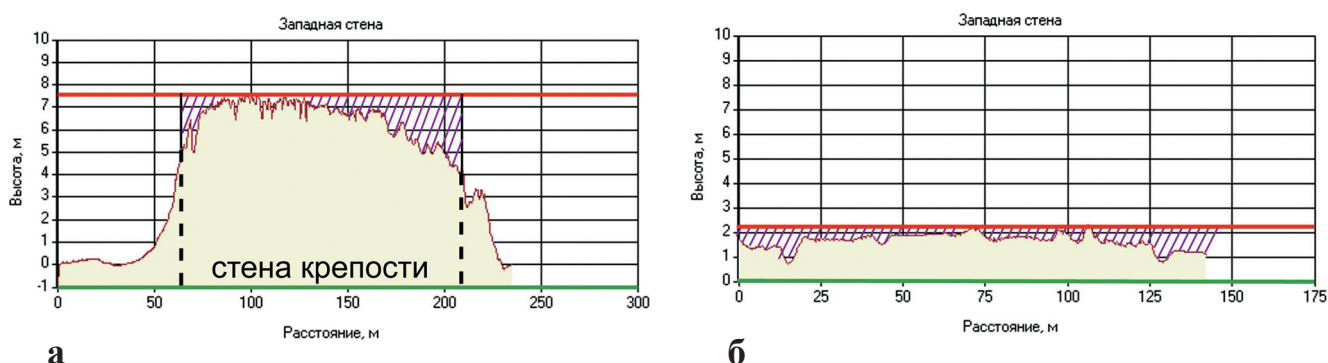


Рис. 8. Продольные профили по гребням стен, построенные по ЦМР ИКР:
а – пример профиля внешней стены, б – пример профиля внутренней стены

различны. Остается предположить, что помимо общих просадок поверхности острова под каждой стеной существуют локальные просадки, вызванные весом стены. Тогда различия между вычисленными линиями гребней стен и принятыми за эталон современными отрезками этих стен (высотой 8 м над подножием стен и 12 м над уровнем озера) можно считать величинами локальных просадок под стенами, которые не были учтены при построении поля деформаций (рис. 5).

Пример определения локальных просадок: внешняя южная стена на ЦМР ИКР идет на уровне 4-5 м, а эталонный уровень – 7,5-8 м. Следовательно, стена на разных участках просела на величины от 3 до 4 мм. Исходя из тех же рассуждений, северо-западный угол крепости, просел на 4-5 м, что следует из профилей по гребням северной и западной стен.

Аналогичные профили были построены для внутренних стен (рис. 8б). Здесь за эталонный уровень была принята отметка 2 м, но, как видно из графиков, средние отклонения не превышают 0,5 м. Это свидетельствует либо о крайне незначительной величине просадок стен (по причине небольшой высоты), либо, что более вероятно, полученные отклонения определяются снижением стен под действием экзогенных процессов – ветров, дождей.

На заключительном этапе построения моделей древнего рельефа памятника Пор-Бажын была получена геотехноморфогенная палеоповерхность (ЦМР ГПП, см. рис. 9) путем сложения поверхности остатков постройки крепости (ЦМР Рд) и поверхности естественного палеорельефа (ЦМР ЕПР).

В результате в полученной геотехноморфогенной палеоповерхности (ЦМР ГПП) исключены

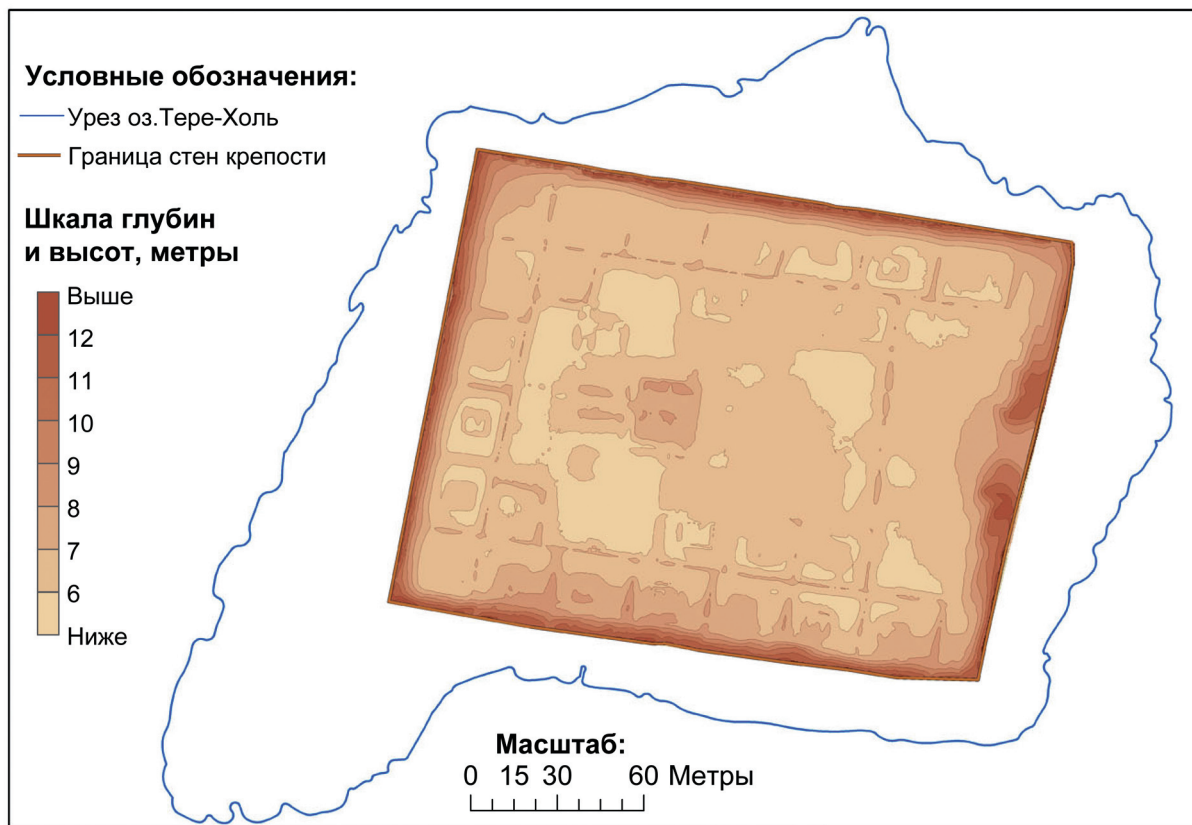


Рис. 9. Модель геотехноморфогенной палеоповерхности

просадки поверхности острова, произошедшие после постройки крепости. Поэтому можно считать, что эта модель отражает состояние острова на момент постройки здесь крепости.

Выводы

В результате ГИС-моделирования получено поле деформаций поверхности острова Пор-Бажин. Его вычитание из современного поля дневных высот и высот погребенной поверхности рельефа позволило реконструировать рельеф острова на момент постройки крепости Пор-Бажин (середина 8 в. н.э.). Полученные результаты должны помочь в изучении палеогеоморфологических особенностей территории острова, а также способствовать проведению дальнейших исследований крепости Пор-Бажин.

Авторы благодарны М.Н. Аникушкину и С.Н. Котельникову (ЗАО НПП «Навгеоком», г. Москва) за предоставление обработанных данных наземного лазерного сканирования, к.и.н. В.А. Завьялову (Институт истории материальной культуры РАН, г. Санкт-Петербург) за предоставление данных по траншейным раскопам, начальнику Пор-Бажинской археологической экспедиции к.и.н. И.А. Аржанцевой (Институт этнологии и антропологии РАН, г. Москва) за всестороннюю поддержку при проведении полевых работ. Финансовая поддержка исследований осуществлялась Культурным Фондом «Крепость Пор-Бажин» (www.por-bajin.ru) и Российским

Фондом Фундаментальных Исследований (проект 09-05-00351-а).

Ключевые слова: ГИС, цифровые модели рельефа, морфометрия, реконструкция палеорельефа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнштейн И.А. Древний Пор-Бажын // Советская этнография. 1964. № 6. С. 113-114.
2. Кузьмин С.Б., Данько Л.В., Черкашин Е.А., Осипов Э.Ю. Цифровые модели рельефа. Методика построения и возможности использования геоморфологического анализа // Геоморфология. 2007. № 4. С. 33-41.
3. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков (учебник с грифом УМО). М. : КДУ, 2008. 424 с.
4. Розанов Л.Л. Теоретические основы геотехноморфологии. М. : ИГ АН СССР, 1990. 189 с.
5. Panin A., Arzhantseva I., Bronnikova M., Zavyalov V., Inevatkina O., Sazonova N., Sheremetskaya E. Palaeoseismic history of the Por-Bajyn early medieval fortress, Tuva republic, Russian Central Asia // Landscape evolution and geoarchaeology. 13th Belgium-France-Italy-Romania geomorphological meeting. June 18-21 2008, Porto Heli, Greece. Abstracts. P. 121-123.
6. Сайт Культурного фонда «Крепость Пор-Бажын». URL: <http://www.por-bajin.ru/> (дата обращения 12.02.2009).