

П.В. ОРЛОВ, к.т.н., начальник управления научно-исследовательских работ Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского,

Л.В. ТАТАУРОВА, кист.н., старший научный сотрудник сектора археологии Омского филиала Института археологии и этнографии СО РАН,

Л.В. БЫКОВ, к.т.н., доцент, заместитель директора ООО «Лаборатория автоматизации геодезических и фотограмметрических работ»,

М.В. ЛАШОВ, аспирант ОмГАУ.

Использование инновационных технологий при построении ландшафтных моделей археологических памятников

В конце XX и начале XXI в. основным способом поиска археологических памятников была наземная разведка, а нанесение объектов на карты зачастую выполнялось приближенно, от ближайшего населенного пункта. Открытие новых археологических комплексов и изучение уже известных памятников древности потребовало применения более точных и производительных методов геодезического позиционирования, а основным источником обзорной информации о местности стали аэрофотоснимки, космические снимки и другие данные дистанционного зондирования (ДДЗ). С возникновением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) появилась возможность выйти на новый уровень по поиску, координированию и установлению границ памятников. В последние десятилетия в российской

археологии значительно возросли объемы работ и расширилась тематика исследований, опирающихся на использование ДДЗ, систем высокоточного спутникового позиционирования и геоинформационных технологий [1]. Развивается своеобразное научное направление, обеспечивающее пространственное моделирование археологических объектов [2]. Это, безусловно, является отражением общих тенденций в современной мировой археологии.

По космическим снимкам проводится камеральная разведка местности. Сопоставление изображений со спутников с имеющимися картами и планами археологических памятников позволяет выявить наиболее общие закономерности в расположении и структуре объектов исследования. Фотопланы, созданные по ДДЗ, служат

для общего знакомства с территорией, уточнения положения археологических памятников относительно картографической основы, планирования работ, выбора конкретных объектов для более тщательного изучения. Главным их преимуществом является доступность материалов, наличие привязки к системе координат местности, минимальные затраты на создание, большая обзорность и высокая детализация изображения. Это подтверждают результаты использования ДДЗ на древнем культурном ландшафте Таманского полуострова [2]. Структурно-пространственный анализ изображений археологических объектов, полученных с помощью данных дистанционного зондирования, позволяет существенно уменьшить затраты на организацию и планирование археологических исследований.



Рис. 1. БПЛА «Эльф ПП-40» на земле и в воздухе

ТОПОГРАФИЧЕСКАЯ ОСНОВА ДЛЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

И в практике археологических исследований [3] все большее применение находят данные дистанционного зондирования. В частности, для нужд археологии разработаны системы аэрокосмического мониторинга [4], включающие подсистемы сбора и хранения информации, обработки данных, пространственное моделирование средствами ГИС и пр. [2]. Главным преимуществом новых технологий является возможность получения и анализа всех материалов в единой системе координат.

В геодезии требования к точности и детальности материалов принято связывать с масштабом картографирования. Так, если изготовленные по космическим снимкам сверхвысокого разрешения фотопланы соответствуют требованиям масштаба 1:2 000–1:10 000, то по аэрофотоснимкам можно изготовить более детальные фотопланы, вплоть до масштаба 1:500, при котором листу формата А4 на местности соответствует площадь 1,5 га (15 000 м²). Такие фотопланы позволяют изучать не только сами археологические объекты, но и их особенности (например, грабительские западины на курганах; планиграфию городищ с хорошо выраженной системой обороны, или планиграфию поселения относительно окружающего ландшафта).

С наименьшими затратами фотопланы могут быть получены по материалам аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). На рис. 1 представлен один из таких аппаратов «Эльф ПП-40», снабженный

комплексом фотографической, телевизионной, навигационной аппаратуры, электродвигателем. Он имеет следующие технические характеристики:

- продолжительность полета 1,5–2 часа;
- производительность аэросъемки 1,5–2 км² за один полет;
- рекомендуемый масштаб фотопланов 1:500–1:2000;
- погрешность построения цифровой модели рельефа (ЦМР) — 0,3 м.

Перечисленные свойства позволяют считать «Эльф ПП-40» наиболее подходящим для выполнения съемки локальных объектов, предварительно выбранных для углубленного изучения по материалам космической съемки. Пример аэроснимка и накидного монтажа, составленного в программном комплексе Photomod, показан на рис. 2.

Дальнейшая обработка снимков требует геодезической привязки к системе координат местности, в качестве которой мы рекомендуем использовать мировую глобальную систему координат WGS84, и проекцию Universal Transverse Mercator (UTM), поскольку координаты географических объектов в этой системе координат не секретны, а применение современных методов спутниковых измерений исключает необходимость привязки к пунктам ГГС.

Геодезическая привязка снимков и последующих детальных съемок на раскопках выполняется с использованием базовой станции. С ее помощью обеспечивается точное (до 1 см) позиционирование. Базовая станция представляет собой спутниковый приемник,

установленный на точке с известными координатами. Такая станция может быть постоянно действующей (например, на крыше офиса), или она может быть временно установлена в поле, в районе работ. Координаты базовой станции целесообразно определять методом точного позиционирования PPP (Precise Point Positioning), не требующим ни привязки к пунктам ГГС, ни дифференциальной коррекции. При этом для компенсации основных погрешностей абсолютных фазовых спутниковых измерений используются точные значения эфемерид и поправок часов спутников, а также информация о задержке спутникового сигнала в ионосфере и тропосфере. Такую информацию в виде отдельных файлов формируют в международных сервисных центрах обработки данных ГНСС-наблюдений (GPS и ГЛОНАСС) и предоставляют пользователям через специализированные интернет-ресурсы.

Для привязки полученных с БПЛА снимков используют контурные точки местности, опознаваемые и на местности и на снимках (опознаки). В степных районах, где опознавание точек местности на аэроснимках затруднено, до аэрофотосъемки выполняют маркировку опознаков искусственными объектами в виде прокопок в форме крестов, квадратов, углов и пр. Для повышения их контрастности с окружающим ландшафтом лучи маркировочного знака засыпают известью или мелом. В горных районах кресты выкладывают из камней, а в таежных — делают вырубку в форме креста. Размер маркировочного знака определяют в зависимости от масштаба

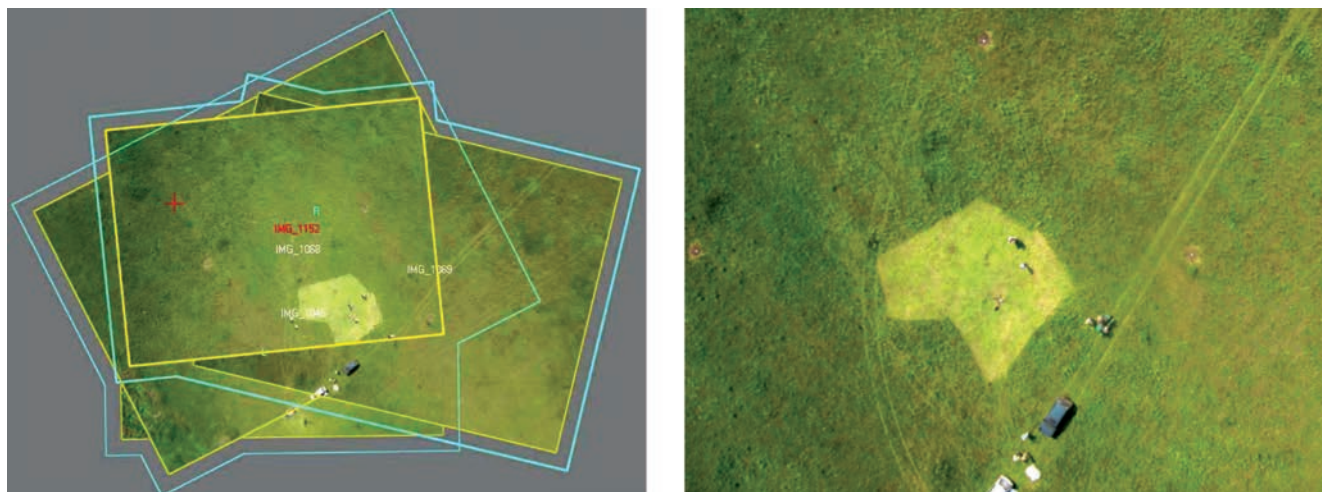


Рис. 2. Накидной монтаж снимков БПЛА и отдельный снимок

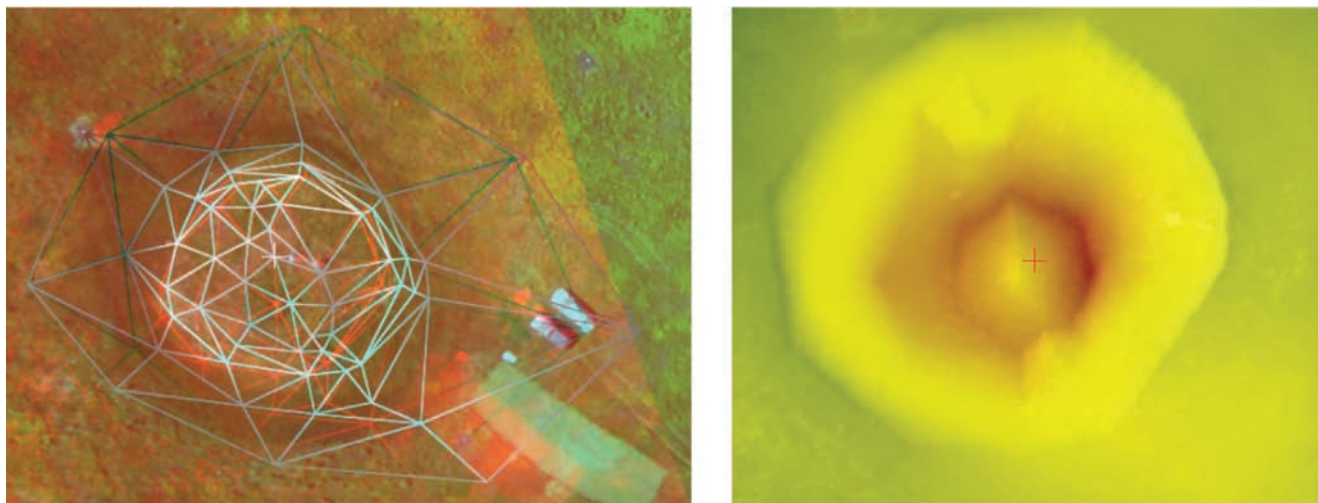


Рис. 3. Нерегулярная сеть треугольников (TIN) и матрица высот (DEM)

аэросъемки с таким расчетом, чтобы длина луча на снимке была не менее 0,25 мм, а ширина не более 0,03 мм.

На каждый объект съемки требуется не менее 5 опорных точек (опознаков), размещенных так, чтобы их изображения на аэроснимках не закрывались перспективой высоких предметов (постройки, деревья) или их тенями. Координаты опознаков определяются спутниковыми приемниками относительно базовой станции в режиме Real Time Kinematic (RTK). Аэрофотоснимки и материалы привязки необходимы для дальнейшей фотограмметрической обработки изображений с целью получения по ним фотопланов, цифровых моделей рельефа и 3D-ландшафтных моделей.

Фотограмметрическая обработка снимков археологического объекта включает калибровку снимков, построение и ориентирование блоков фототриангуляции, создание цифровой модели рельефа по стереопарам снимков и создание фотопланов. Весь комплекс работ выполняется на ЦФС «Photomod». В результате фотограмметрической обработки создается фотоплан, матрица высот, нерегулярная сеть треугольников Triangulated Irregular Network (TIN) — все необходимое для построения 3D-ландшафтной модели местности.

Калибровка снимков производится с целью учета искажений центральной проекции снимка, вносимых объективом, сенсором и внешними условиями фотографирования. Одним из основных способов фотограмметрической калибровки является способ, основанный на фотографировании пространственного

тест-объекта. Тест-объект создают в виде марок, закрепленных на фасадах или в интерьерах зданий, имеющих пространственную глубину (выступающие пристройки, углы зданий). Координаты марок определяют высокоточными геодезическими методами. Производят фотографирование тест-объекта калибруемой камерой и определяют параметры калибровки: фокусное расстояние камеры, координаты главной точки, параметры дисторсии объектива. Влияние внешних факторов можно учесть лишь в условиях специального калибровочного полигона.

Построение и ориентирование блоков фототриангуляции выполняется с целью приведения аэроснимков к системе координат местности. На этапе формирования блока производится создание накидного монтажа — непрерывного изображения, составленного из перекрывающихся снимков. Исходными данными для точного построения блока являются координаты опорных точек, полученные в процессе привязки снимков, и элементы внутреннего ориентирования, вычисленные в результате калибровки фотоаппарата. Дополнительные данные получают, непосредственно измеряя снимки в процессе следующих технологических этапов:

- внутреннего ориентирования — определения параметров, устанавливающих положение и ориентацию системы координат снимка относительно системы координат цифрового изображения;
- взаимного ориентирования — определения взаимного положения

снимков по результатам измерения координат связующих точек смежных снимков;

- внешнего ориентирования — определения положения блока в пространстве относительно опорных точек.

Исходные данные и результаты измерения снимков используются при построении и уравнивании блока снимков. В итоге по парам перекрывающихся снимков создаются стереомодели, позволяющие выполнять бесконтактные трехмерные измерения координат точек местности.

Формирование цифровой модели рельефа (ЦМР) по стереопарам снимков выполняется по предварительно созданным структурным линиям рельефа местности, и включает:

- создание векторных объектов в процессе стереоскопической векторизации снимков;
- построение ЦМР в виде нерегулярной сети треугольников (TIN);
- построение ЦМР в виде регулярной матрицы высот (DEM);
- создание гладких горизонталей с заданным сечением рельефа.

Нерегулярная сеть треугольников TIN в системе Photomod строится на основе базовых слоев, содержащих пространственные векторные объекты, созданные в процессе стереовекторизации. В дальнейшем модель TIN преобразуется в регулярную сеть (DEM), или матрицу высот (рис. 3).

Создание ортофотопланов по исходному блоку изображений выполняется с целью исправления искажений, вызванных влиянием рельефа местности,

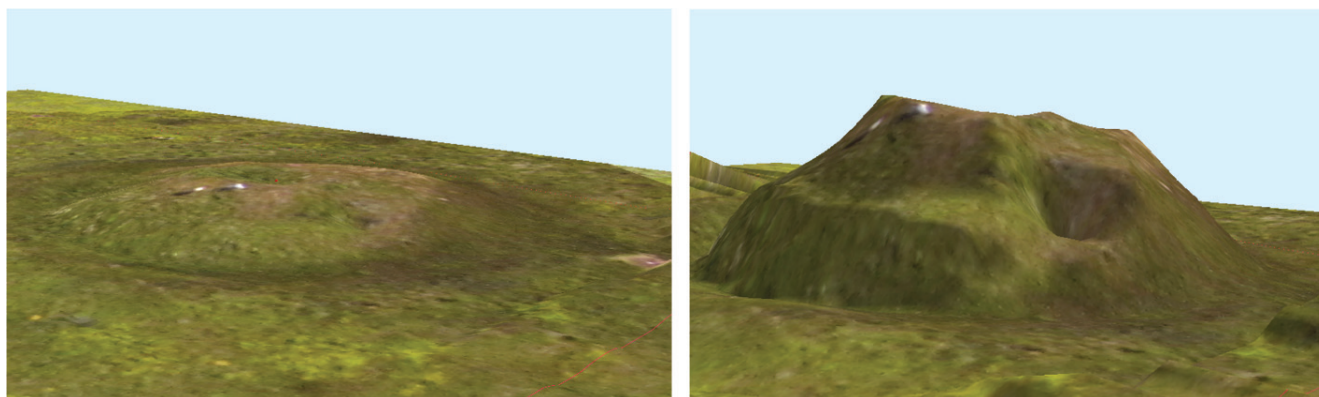


Рис. 4. Трехмерная модель местности в реальном и увеличенном вертикальном масштабах

наклоном оптической оси фотокамеры и ее дисторсией. При построении ортофотоплана задаются его масштаб, границы блока, размер листов, размер пикселя ортофотоплана, а также формат выходного файла и тип геодезической привязки выходного изображения.

Первичная трехмерная модель местности (рис. 4) строится в программном продукте Photomod 3D-Mod, который предназначен для построения 3D-объектов по созданным в системе Photomod векторам. В 3D-Mod выполняется редактирование, текстурирование и экспорт модели в необходимый формат данных для дальнейшего использования в других программных продуктах.

Обзорная модель местности, построенная по предложенной методике, призвана помочь археологам оценить границы памятника, его ландшафтные особенности и выбрать конкретные объекты для раскопок.

ТЕХНОЛОГИЯ ДЕТАЛЬНОЙ СЪЕМКИ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Детальная съемка рельефа и контуров выбранных объектов, а также построение планов находок, обнаруженных в ходе проведения раскопок, осуществляется с помощью системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Она выполняется в режиме Real Time Kinematic (RTK), принцип работы которого заключается в том, что базовая станция устанавливается на точке с известными координатами и передает поправки на полевой приемник (ровер) с помощью радиомодема или GSM-соединения.

Вычислительная обработка результатов спутниковых измерений осуществляется в программном комплексе GrafNav\GrafNet, который позволяет

одновременно обрабатывать измерения мобильного приемника и до восьми базовых станций. Возможно вычисление координат отдельных точек, траекторий и событий во время сеанса наблюдений. Программный комплекс поддерживает форматы данных первоначальных измерений большинства существующих на рынке приемников. Возможна обработка одночастотных (L1), двухчастотных (L1/L2) измерений, а также совместная обработка GPS- и ГЛОНАСС-данных. Пакет GrafNav\GrafNet позволяет реализовать технологию PPP при определении координат базовых станций без привязки к пунктам ГГС и ГНС.

Пакет GrafNav предназначен для многобазовой постобработки статических и кинематических измерений, выполненных в кодовом или фазовом режиме. В зависимости от методики сбора данных, качества измерений и применяемого режима обработки обеспечиваются субметровая или субсантиметровая точность позиционирования. Программный комплекс ориентирован на обработку траекторных измерений, однако возможна и многобазовая обработка одиночных статических сеансов наблюдений.

Пакет GrafNet ориентирован на постобработку данных статических съемок (например, при сущности сетей или создании опорного обоснования). В состав пакета входят модули для вычисления невязок по замкнутым полигонам, уравнивания сетей и трансформации координат. GrafNet может использоваться для пакетной обработки множества сеансов наблюдений от одной базовой станции.

Стратегия съемки рельефа выбирается в зависимости от характера снимаемого объекта. Например, небольшие курганы могут быть сняты способом обхода, а более сложные объекты — путем построения профилей или сочетанием со способом обхода. В зависимости от характера микроформ рельефа устанавливается максимальный шаг съемки, причем, для корректного построения цифровых моделей местности пикеты выбираются в местах перегибов рельефа. Пикеты целесообразно распределять по слоям, что позволяет корректно построить структурные линии рельефа местности. В первый слой записываются пикеты, выбранные на наиболее характерных местах естественной поверхности, а во второй слой — пикеты, полученные при съемке нарушений естественной поверхности: ям, раскопов, промоин (рис. 5).

Для корректного построения ЦМР строятся структурные линии рельефа местности путем последовательного соединения пикетов ломаными линиями в той же последовательности, в которой выполнялась съемка. При этом вначале полилинии строятся по пикетам первого слоя, описывающим естественную поверхность объекта, а затем — по пикетам второго слоя, описывающим искусственные микроформы рельефа. При необходимости две эти группы полилиний следует согласовать (рис. 6).

Основным принципом многослойности является то, что каждый из слоев полностью независим от остальных. Слои можно делать видимыми или не видимыми, редактируемыми или не редактируемыми, активными или не активными. Слои позволяют

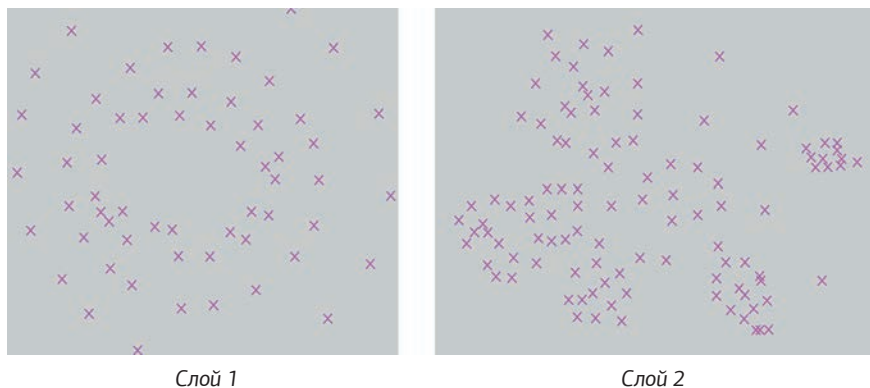


Рис. 5. Распределение пикетов по слоям в с. Ново-Оболонь Омской обл.

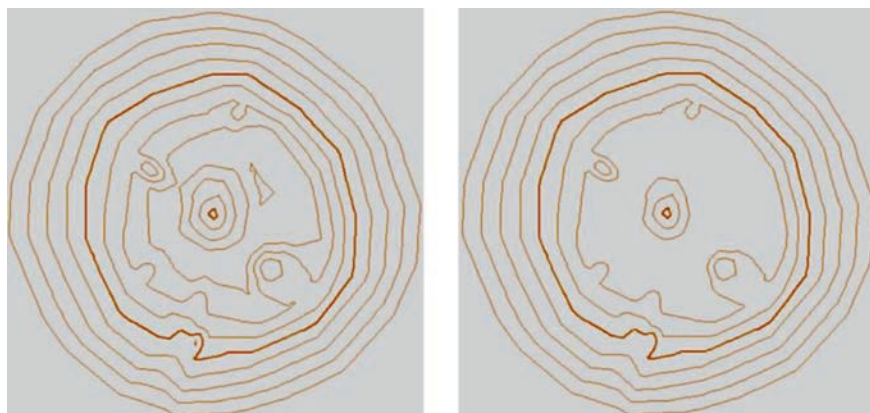


Рис. 7. Построение горизонталей по матрице высот и формирование среза грунта

создавать графические композиции, осуществлять групповую обработку информации, готовить проекты и чертежи с помощью компоновки выбранных элементов.

Формирование среза грунта на ЦММ выполняется в модуле Photomod VectOr. С этой целью по матрице высот строятся горизонталы с шагом, кратным планируемому срезу грунта, и формируется пользовательская карта, соответствующая текущему срезу грунта. Эту карту в дальнейшем можно использовать для нанесения объектов, найденных на данном уровне (рис. 7). При последующих срезах аналогично создаются соответствующие пользовательские карты. При необходимости возможна одновременная работа с несколькими картами.

Для единообразного отображения находок на карте необходимо в модуле VectOr разработать классификатор, включающий код объекта, его наименование, условное обозначение и правила семантического описания. Координирование мест обнаружения артефактов до нулевой поверхности выполняется с помощью системы спутниковой навигации

ГЛОНАСС и GPS и частично с использованием тахеометра. При углублении ниже нулевой поверхности необходима досъемка и корректировка ЦММ.

Классификация выполняется по коду в процессе съемки. В случае обнаружения непредусмотренных в классификаторе объектов, добавляются коды и наименования к классификатору.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные методические приемы использования беспилотных летательных аппаратов для построения трехмерных ландшафтных моделей местностей позволят точно привязать археологические комплексы к системе координат местности и создать ландшафтную модель территории, в которой эти объекты сформировались, функционировали и стали археологическими.

Ландшафтная модель и точная детальная съемка рельефа дают возможность определить планиграфию археологического объекта с выявлением его структурных особенностей и границ археологического памятника. Это существенно облегчает задачи по

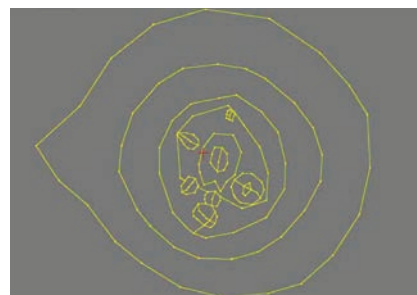


Рис. 6. Построение полилиний по пикетам

постановке археологического объекта на учет в охранные организации и выводу территории памятника из хозяйственного использования.

Выявление планиграфических особенностей археологического памятника позволит выбрать оптимальное место для проведения исследований и точно привязать границы раскопа к местности с указанием координат реперных точек. При долговременном исследовании наличие этих координат обеспечит точную прирезку новых площадей для раскопок.

Создание ЦМР, нанесение на нее границ раскопа и возможность послойного распределения найденных артефактов и сооружений в пределах раскопа создаст условия для выхода на следующий уровень построения реконструкций. Моделирование облика раскопанных объектов с учетом их взаимосвязей даст возможность решать уже исторические и социально-культурные задачи.

Литература

1. Малинников В.А., Нзеха М., Учаев Д.В. и др. Методика геоинформационного моделирования структуры древних поселений на основе фрактальных методов. «Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка». 2009, № 3, с. 76–79.
2. Гарбузов Г.П. Геоинформационные системы и дистанционное зондирование Земли в археологических исследованиях: на примере Таманского полуострова/Автореферат дисс. к.ист.н. М., 2007.
3. Гарбузов Г.П. Археологические исследования и дистанционное зондирование Земли из космоса. «Российская археология». 2003, № 2, с. 45–55.
4. Нзеха М. Аэрокосмический мониторинг археологических объектов. Инновационные технологии в экологии. Сб. науч. трудов//Отв. ред. А.В. Садов. М., Изд-во МИИГАиК, 2008, с. 58–65.