

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Рассмотрены возможности методов современной геодезии, цифровой фотограмметрии и картографии в приложении к археологическим исследованиям. На примерах показано применение данных дистанционного зондирования из космоса, материалов аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата, а также методов высокоточного спутникового позиционирования и цифровой картографии при изучении исторических объектов. Предложена технология геодезического сопровождения археологических работ на различных этапах археологических исследований.

Ключевые слова: археология, геодезия, данные дистанционного зондирования, космические снимки, беспилотный летательный аппарат, аэрофотоснимок, привязка снимка, базовая станция, GPS приемник, модель местности, рельеф, контур, цифровая модель местности, цифровая модель рельефа, план, фотоплан.

Введение. На рубеже нового тысячелетия в геодезии и картографии произошла грандиозная техническая революция. Пользователям стали доступны данные дистанционного зондирования (ДДЗ) сверхвысокого разрешения. Распространились методы высокоточного позиционирования, основанные на использовании спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС. Появились цифровые фотограмметрические и картографические технологии, позволяющие создавать карты как в двумерном (2D), так и в трехмерном (3D) формате. Все это способствовало развитию прикладного использования тематического картографирования, в том числе и при археологических исследованиях. Например, использование спутниковых снимков позволяет проводить «виртуальную» разведку местности и сопоставлять имеющиеся топопланы археологических памятников с данными снимков со спутников. Для более точного определения месторасположения археологического памятника, фиксации его координат, а также выявления возможных мест обнаружения новых археологических объектов потребуются и более точные инструменты.

В археологии, как правило, используются методы традиционной геодезии. Основным источником информации о местности являются мелкомасштабные топографические карты, космические снимки и аэрофотоснимки, не привязанные к системе координат местности. Топографические съемки исторических памятников и составление планов раскопок выполняются в условных системах координат. Привязка этих материалов к системе координат местности считается не целесообразной в связи с секретностью координат пунктов государственной геодезической сети (ГС) и значительной трудоемкостью этого процесса. В результате многочисленные картографические материалы, ДДЗ, планы наземных съемок представляют собой разрозненные документы, не имеющие пространственного совмещения и ограничивающие возможности и преимущества комплексного анализа данных.

Современные геодезические технологии позволяют существенно упростить процессы позиционирования на местности, а главное, объединить все исходные материалы в единой общедоступной системе координат. Цифровые картографические системы обеспечивают единую классификацию объектов. В результате топографо-геодезических и картогра-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт №14.740.11.1392.

фических работ создаются материалы, необходимые для цифровой 3D-реконструкции исторических памятников. Разработка современной методики и технологии геодезического обеспечения археологических исследований представляется актуальной задачей.

Использование ДДЗ. Данные дистанционного зондирования – это наиболее доступные данные о поверхности Земли, объектах, расположенных на ней или в ее недрах. Самый распространенный вид ДДЗ – снимки земной поверхности, полученные в разных спектральных диапазонах. Снимки позволяют не только выявлять различные явления и объекты, но и оценивать их количественные и качественные характеристики. Для получения ДДЗ применяются разнообразные технологии. Так, сенсором может регистрироваться как собственное излучение земной поверхности, так и отраженное излучение других источников – Солнца или самой съемочной аппаратуры. В последнем случае часто используется когерентное излучение, позволяющее регистрировать интенсивность обратного рассеяния от земной поверхности, его поляризацию, фазу и доплеровское смещение, что обеспечивает получение дополнительной информации. Использование активных датчиков – радаров и лидаров, позволяет выполнять съемку в любое время суток и в любых метеоусловиях.

Спутники для дистанционного зондирования Земли запускают в основном на круговые орбиты. Такой спутник пролетает над различными участками Земли на одинаковой высоте, что обеспечивает равенство масштаба съемки. Съемочную аппаратуру размещают на различных платформах. На одной платформе может располагаться несколько съемочных устройств (датчиков). Чем ближе к изучаемому объекту находится платформа с датчиком, тем больше будет детализация снимков.

Для получения крупномасштабных снимков используются космические снимки сверхвысокого разрешения, полученные со спутников QuickBird, WorldView1, WorldView2, GeoEye-1. Площадь земной поверхности, изображаемой на одной сцене, составляет от 120 до 250 кв. км при разрешающей способности 0,4–0,6 м на местности. В комплект поставки снимков входят файлы метаданных, которые позволяют ориентировать снимки с погрешностью около 3 метров без использования наземных точек для привязки изображений. Стоимость архивных снимков (минимум прошлогодних) составляет \$10 – \$14 за 1 кв. км при минимальной площади сцены – 25 кв. км. Для некоммерческого использования имеются архивные снимки, которые предоставляются бесплатно на ресурсе Google Earth. Для создания фотопланов с более высокой точностью требуется привязка снимков, которая выполняется геодезическими методами. Фотопланы могут быть изготовлены в программном комплексе PHOTOMOD (фирма Ракурс, Россия). В настоящее время марка PHOTOMOD объединяет широкий набор программных средств цифровой фотограмметрической обработки ДДЗ, позволяющих получать пространственную информацию на основе изображений практически всех коммерчески доступных съемочных систем, таких как кадровые цифровые и пленочные камеры, космические сканирующие системы высокого разрешения, а также радары с синтезированной апертурой. PHOTOMOD может использоваться как локальная полнофункциональная цифровая фотограмметрическая станция и как распределенная сетевая среда для реализации больших проектов.

Фрагмент фотоплана, изготовленного из снимка со спутника Worldview2, показан на рис. 1.



Рис. 1. Фотоплан Некрополя в районе с. Ново-Оболонь, Горьковского района, Омской области

Фотопланы, созданные по ДДЗ, являются обзорными материалами и могут использоваться для общего знакомства с территорией, планирования работ, выбора конкретных объектов для более тщательного изучения. Доступность материалов, простота обработки, минимальные затраты, большая обзорность и высокая детализация изображения – главные преимущества фотопланов, изготовленных по ДДЗ сверхвысокого разрешения. Более точные и детальные материалы могут быть получены по материалам аэрофотосъемки.

Использование материалов аэрофотосъемки. В геодезии приняты требования к точности и детальности материалов связывания с масштабом картографирования. Так, если фотопланы, изготовленные по космическим снимкам сверхвысокого разрешения, отвечают требованиям масштаба 1:10 000, то аэроснимки позволяют изготовить более детальные фотопланы, вплоть до масштаба 1:500, при котором листу формата А4 соответствует площадь 1,5 га (15 000 кв. м) на местности.

С наименьшими затратами фотопланы могут быть получены по материалам аэрофотосъемки с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). БПЛА представляет собой сверхлегкий летательный аппарат. Масса

полного комплекта не превышает 5 кг. На рис. 2 представлен БПЛА «Эльф ПП-40».

Аппарат снабжен комплектом фотографической, телевизионной и навигационной аппаратуры. В качестве силовой установки используется электрический двигатель. Продолжительность полета – 1,5–2 ч. Производительность аэросъемки – 1,5–2 кв. км за один полет. Рекомендуемый масштаб фотопланов 1:500–1:2000. Погрешность построения цифровой модели рельефа – ЦМР – 1 м. Исходя из перечисленных параметров Комплекс «Эльф ПП-40» оптимально подходит для съемки локальных объектов, предварительно выбранных по материалам космической съемки для углубленного изучения. Пример аэроснимка и накидного монтажа, составленного в программном комплексе PHOTOMOD, показан на рис. 3.

Дальнейшая обработка снимков требует геодезической привязки к системе координат местности. В качестве исходной системы координат целесообразно выбрать мировую глобальную систему координат WGS-84, и ее производную – проекцию поверхности Земли на плоскость Universal Transverse Mercator (UTM). Координаты географических объектов в этой системе координат не секретны, а современные методы спутниковых геодезических измерений не требуют привязки к пунктам ГГС.



Рис. 2. БПЛА «Эльф» на земле и в воздухе

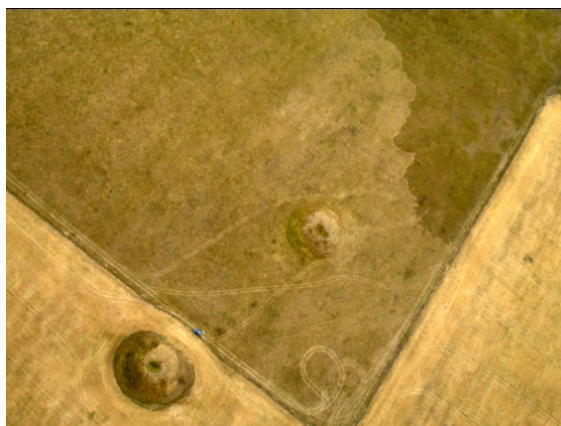


Рис. 3. Накидной монтаж съемки с БПЛА и отдельный снимок

Для геодезической привязки снимков и последующих детальных съемок на раскопках необходимо создать базовую станцию, с помощью которой может быть обеспечено точное позиционирование. Базовая станция представляет собой спутниковый приемник, установленный на точке с известными координатами. Такая станция может быть постоянно действующей (например, установленной на крыше офиса) или она может быть временно установлена в районе работ. Координаты базовой станции целесообразно определять методом точного позиционирования Precise Point Positioning (PPP). Важной особенностью метода PPP является то, что он не требует наличия пунктов ГГС и дифференциальной коррекции. Для компенсации основных погрешностей, возникающих при абсолютных фазовых спутниковых измерениях, в данном методе используются точные значения эфемерид и поправок часов спутников, 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. В этом случае можно не заботиться о долговременной сохранности базовой станции, а устанавливать ее каждый раз в месте, удобном для работы. Технология PPP реализована в программном обеспечении (ПО) GrafNav/GrafNet.

Для привязки снимков используют контурные точки, опознаваемые на местности и на снимках. В малоконтурных районах и там, где опознавание контурных точек местности на аэроснимках затруднено, осуществляют маркировку опознаков. Маркировка может выполняться искусственными объектами или прокопкой в виде крестов, квадратов, углов и т. п. На каждый объект съемки требуется не менее 5 опорных точек. Маркируемые опознаки должны располагаться таким образом, чтобы их изображения на аэроснимках не закрывались изображениями высоких предметов (постройками, деревьями) или их тенями. Для маркировки применяют дешевые местные материалы, обеспечивающие максимальный контраст между маркировочным знаком и фоном. Чаще всего для этого используют известь и мел, которыми засыпают лучи маркировочного знака, предварительно сняв дерн. В горных районах кресты выкладывают из камней, а таежных – делают вырубку в форме креста. Размер маркировочного знака определяют в зависимости от масштаба аэросъемки с таким расчетом, чтобы длина луча на снимке была не менее 0,25 мм, а ширина – не более 0,03 мм. Координаты опознаков определяются спутниковыми приемниками относительно БС в режиме Real Time Kinematic (RTK). Аэрофо-

тоснимки и материалы привязки необходимы при дальнейшей фотограмметрической обработке изображений для получения по ним фотопланов, цифровых моделей рельефа и 3D ландшафтных моделей.

Целью фотограмметрической обработки является объединение отдельных снимков в единое изображение в заданной системе координат с необходимой для практических целей точностью. Фотограмметрическая обработка снимков включает в себя:

- а) калибровку снимков;
- б) построение и ориентирование блоков фототриангуляции;
- в) создание цифровой модели рельефа по стереопарам снимков;
- г) создание фотопланов.

Весь комплекс работ выполняется на ЦФС PHOTOMOD. В результате фотограмметрической обработки снимков создается фотоплан, матрица высот, нерегулярная сеть треугольников Triangulated Irregular Network (TIN) – все необходимое для построения 3D ландшафтной модели местности.

Калибровка снимков выполняется с целью учета искажений центральной проекции снимка, вносимых объективом, сенсором, 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 пространственного 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. Параметры калибровки учитываются при фотограмметрической обработке снимков.

Построение и ориентирование блоков фототриангуляции. Целью фототриангуляции является ориентирование аэроснимков в системе координат местности. На этапе формирования блока производится создание накидного монтажа – непрерывного изображения, приближенно 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 путем непосредственного измерения снимков в процессе выполнения следующих технологических этапов:

1) внутреннего ориентирования – вычисление параметров, определяющих положение и ориентацию системы координат снимка относительно системы координат цифрового изображения;

2) взаимного ориентирования – определение взаимного положения снимков по результатам измерения координат связующих точек на снимках блока;

3) 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. На рис. 4 представлена одна из таких моделей.

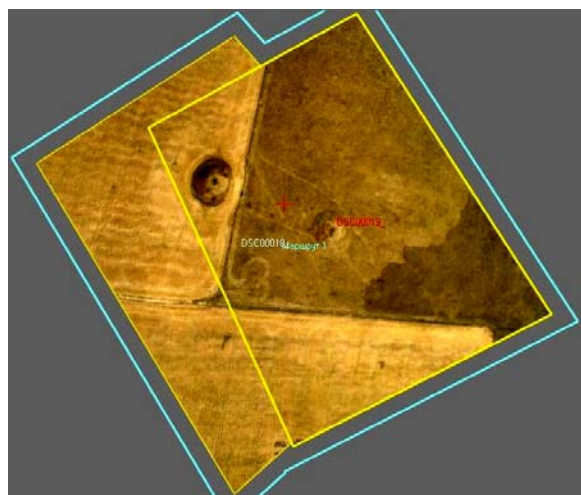


Рис. 4. Стереоскопическая модель местности

При рассматривании стереомодели через 3D-очки в зрительном ощущении наблюдателя возникает пространственная модель местности, аналогичная той, какую мы видим в стереокино. Она доступна для измерения автоматическому коррелятору, а при определенном навыке и самому наблюдателю. Стереоскопическая модель исполь-

зуется для топографической съемки объектов и рельефа местности.

Создание цифровой модели рельефа.

Для построения ЦМР по стереомоделям набирают высотные пикеты и полилинии. Исходными данными для создания ЦМР служат пространственные структурные линии рельефа, построенные в характерных местах рельефа местности. Основным видом ЦМР является нерегулярная сеть треугольников – TIN, которая может быть преобразована в регулярную сеть с образованием матрицы высот – DEM, или представлена совокупностью горизонталей. Процесс построения ЦМР включает в себя следующие этапы:

1) векторизацию стереомоделей – создание пикетов и векторных объектов;

2) построение ЦМР в виде нерегулярной сети треугольников – TIN;

3) построение ЦМР в виде матрицы высот – DEM;

4) создание гладких горизонталей с заданным значением высоты сечения рельефа.

На рис. 5 показан пример построения векторных объектов и TIN по стереомодели. TIN является основой для формирования DEM, горизонталей и 3D-модели местности. На рис. 5 представлен результат создания векторных объектов и TIN по стереомоделям. Материалы аэросъемки были получены с БПЛА.

Цифровая модель рельефа необходима для трансформирования снимков при создании фотопланов.

Создание ортофотопланов.

Ортофотоплан создается по исходному блоку изображений. В процессе трансформирования снимков исправляются искажения, вызванные рельефом местности, наклоном оптической оси фотокамеры и ее дисторсии. При построении ортофотоплана необходимо задать границы блока и размер листов, размер пикселя ортофотоплана, масштаб карты, а также вид используемой ЦМР. Фотоплан, построенный по материалам аэросъемки с БПЛА, показан на рис. 6.

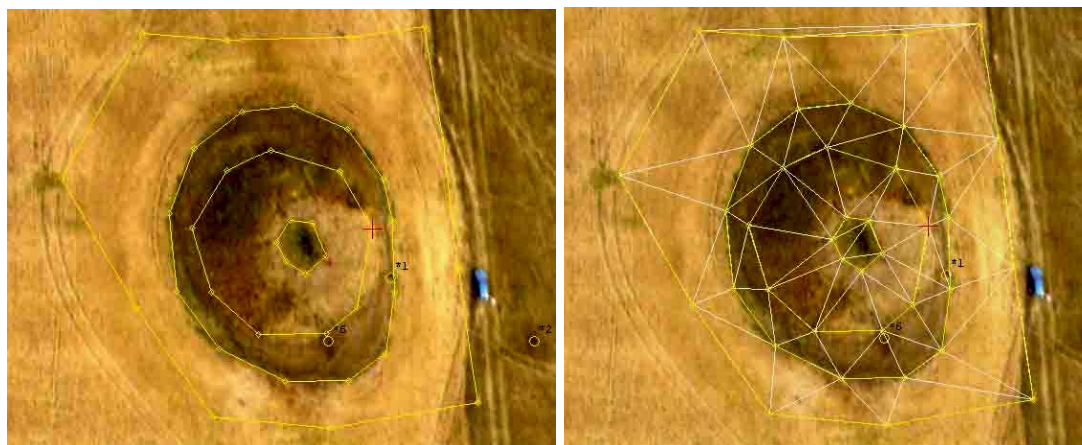


Рис. 5. Построение векторных объектов и TIN по стереомодели кургана

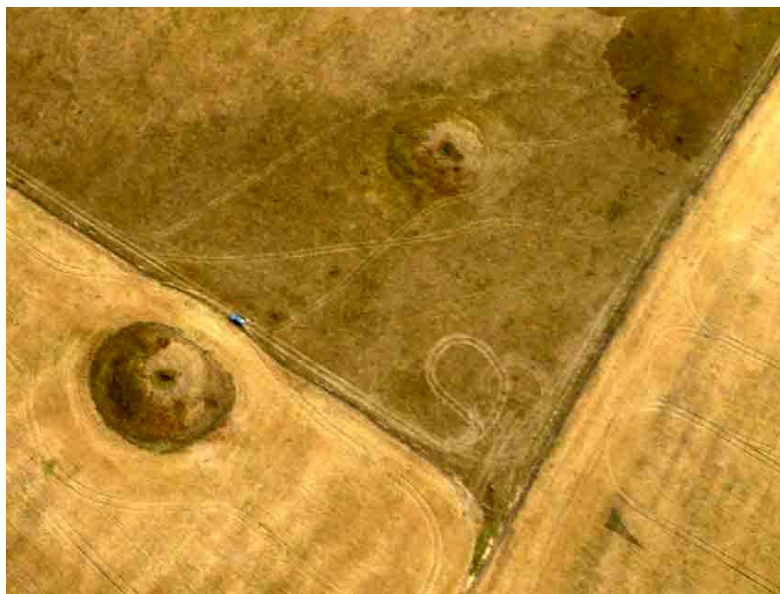


Рис. 6. Фотоплан курганов Некрополя в районе с. Ново-Оболонь Горьковского района Омской области

Хотя фотоплан представляет собой двумерную модель местности, он может быть использован в сочетании с матрицей высот. Тогда каждая точка фотоизображения будет характеризоваться трехмерными координатами. При создании 3D ландшафтной модели фотоплан может быть использован в качестве текстуры для формирования реалистичного макета местности.

Трехмерная модель местности создается в модуле PHOTOMOD 3D-MOD, который предназначен для построения 3D-объектов по созданным в системе PHOTOMOD векторам. В модуле 3D-MOD выполняется редактирование, текстурирование и экспорт модели в необходимый формат данных для дальнейшего использования в другом ПО. Последовательность работ состоит в следующем:

- 1) экспорт векторных объектов и ЦМР в файлы обменного формата;
- 2) импорт векторных объектов и ЦМР из файлов обменного формата во внутренний формат 3D-MOD;
- 3) 3D-моделирование местности;
- 4) экспорт 3D-модели в обменный формат системы автоматизированного проектирования, например, AUTOCAD, ARCHICAD и другие среды.

Таким образом, с помощью материалов аэросъемки с БПЛА создаются цифровые модели местности, фотопланы, ландшафтные 3D-модели местности, призванные помочь специалистам детально изучить археологические памятники, определить направления дальнейших исследований и выбрать конкретные объекты для раскопок.

Объекты, намеченные для раскопок, подлежат точной детальной наземной съемке. Точная детальная съемка рельефа и контуров на раскопках осуществляется с помощью системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS. Для выполнения геодезических работ в районе проведения раскопок

необходимо использовать базовую станцию. Детальная съемка выполняется в режиме Real Time Kinematic (RTK).

Принцип работы режима RTK заключается в том, что базовая станция, установленная на точке с известными координатами, передает поправки на полевой приемник (ровер) с помощью радио-модема или GSM-соединения. Стратегия съемки выбирается в зависимости от характера снимаемого объекта. Небольшие курганы могут быть сняты способом обхода. Более сложные объекты снимают способом построения профилей или сочетанием со способом обхода. В зависимости от характера микроформ рельефа устанавливается шаг съемки. Для корректного построения цифровых моделей местности пикеты выбираются в местах перегибах рельефа местности. Пикеты целесообразно распределять по слоям. В первый слой записываются пикеты, выбранные на наиболее характерных местах естественной поверхности кургана. Во второй слой помещаются пикеты, полученные при съемке нарушений естественной поверхности: ям, раскопов, промоин. На рис. 7 показаны пикеты, набранные таким образом.

Распределение пикетов по слоям позволяет корректно построить структурные линии рельефа местности.

Вычислительная обработка результатов измерений выполняется в программном комплексе GrafNav/GrafNet. Комплекс позволяет одновременно обрабатывать измерения мобильного приемника и до 8 базовых станций. Возможно вычисление координат отдельных точек, траекторий и событий во время сеанса наблюдений. Программный комплекс поддерживает форматы данных первоначальных измерений большинства приемников, существующих на рынке. Возможна обработка одночастотных (L1), двухчастотных (L1/L2) измерений,

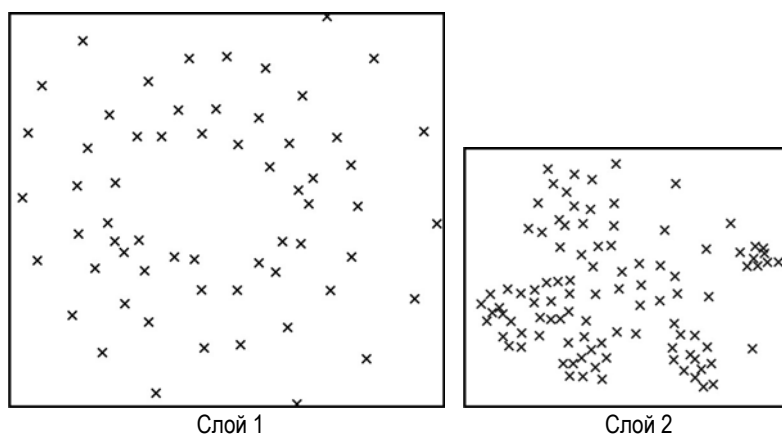


Рис. 7. Распределение пикетов по слоям

а также совместная обработка GPS и ГЛО-НАСС данных. Пакет GrafNav/GrafNet позволяет реализовать технологию PPP при определении координат базовых станций без привязки к пунктам ГГС и ГНС. Наиболее точные результаты получаются в системе координат WGS-84. Координаты пикетов, вычисленные в комплексе GrafNav/GrafNet экспортируются в текстовый файл, совместимый с обменным форматом PHOTOMOD.

Для корректного построения ЦМР необходимо построить структурные линии рельефа местности. По сути, следует последовательно соединить пикеты ломаными линиями в той же последовательности, в которой выполнялась съемка. Для облегчения проце-

дуры следует сначала подгрузить пикеты первого слоя, описывающие естественную поверхность объекта, и построить по ним полилинии. Затем подгрузить пикеты второго слоя, описывающие искусственные микроформы рельефа, и построить полилинии по ним. При необходимости следует согласовать эти две группы полилиний. В результате получится построение, показанное на рис. 8.

По векторным объектам создается ЦМР в виде TIN и матрицы высот DEM. В отличие от аналогичных построений, представленных на рис. 5, модели на рис. 9 отличаются высокой точностью и абсолютной детальностью.



Рис. 8. Построение полилиний по пикетам

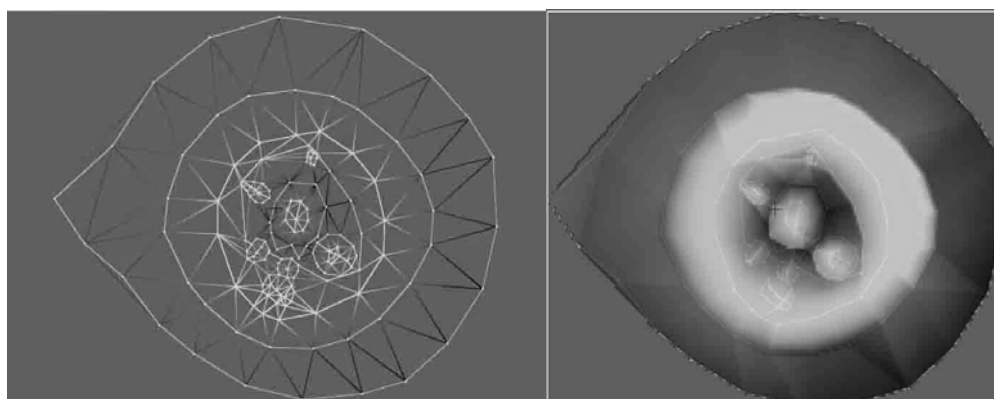


Рис. 9. Нерегулярная сеть треугольников (TIN) и матрица высот

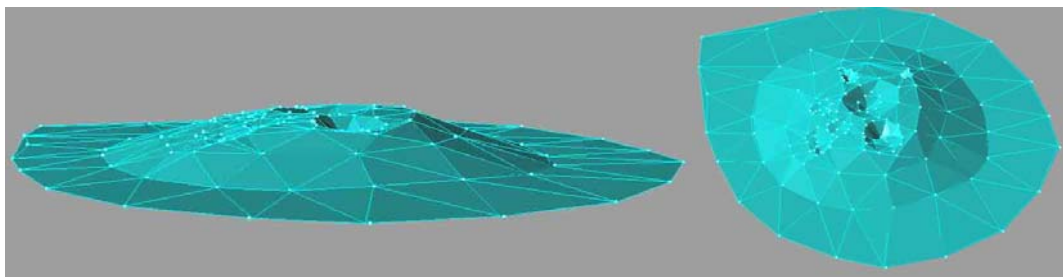


Рис. 10. Трехмерная модель кургана

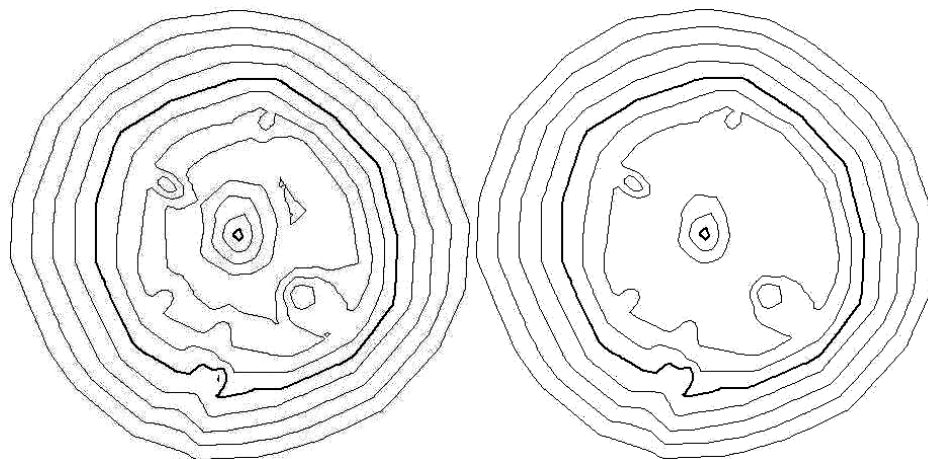


Рис. 11. Построение горизонталей по матрице высот и формирование среза грунта

Трехмерная модель объекта, построенная по TIN, дает наиболее наглядное представление о характере рельефа местности. Она пригодна не только для визуализации объекта, но и для решения задач по определению объема грунта, построения горизонталей, планирования работ по раскопкам. На рис. 10 показана модель, построенная по результатам наземной съемки кургана, выполненной с помощью спутниковых приемников. Построение выполнено в модуле 3D-MOD.

Результаты построений: фотопланы, матрицы высот, TIN, – экспортируются в картографический модуль PHOTOMOD – VectOr. В модуле VectOr выполняется векторизация объектов, оформление плана в условных знаках, зарамочное оформление. Для единообразного отображения объектов на карте необходима разработка классификатора. Классификатор создается в модуле VectOr. Картографический модуль содержит библиотеку классификаторов, которые можно дополнять и настраивать на любой круг задач. Общими принципами создания классификатора объектов являются: кодировка объектов, выбор стандартного наименования, формирование условного обозначения, составление правил семантического описания.

Переходя к геодезическому сопровождению раскопок необходимо спроектировать последовательность среза грунта. Для этого на ЦМР по матрице высот строятся горизонталы с шагом, кратным высоте планируемого среза грунта. Формируется поль-

зовательская карта, соответствующая текущему срезу грунта. На эту карту в дальнейшем будут наноситься артефакты, найденные на данном уровне. При последующих срезах с карты удаляется отработанный пласт, и аналогично создаются последующие пользовательские карты. При необходимости возможна одновременная работа с несколькими картами. На рис. 11 показаны исходная карта (слева) и карта с удаленным верхним слоем (справа).

Координирование мест обнаружения артефактов до нулевой поверхности выполняется с помощью системы спутниковой навигации ГЛОНАСС и GPS и частично с использованием тахеометра. Найденные предметы наносятся на карту, соответствующую данному пласту. Классификация выполняется по коду в процессе съемки. В случае обнаружения не предусмотренных артефактов необходимо выполнить добавления кода и наименования в классификатор. В постобработке в классификатор вносятся соответствующие изменения. При углублении ниже нулевой поверхности необходима досъемка и корректировка ЦМР, которая может выполняться в модуле VectOr.

Таким образом, предлагается комплексная методика геодезического сопровождения археологических исследований на всех стадиях выполнения работ.

На стадии предварительного изучения местности обеспечивается обработка ДДЗ с целью создания обзорных фотопланов для общего знакомства с территорией, планиро-

вания работ, выбора конкретных объектов для более тщательного изучения.

На этапе выбора ключевых участков местности для более тщательного изучения предлагается использование материалов аэросъемки с БПЛА для создания крупномасштабных планов, моделей рельефа и детальных трехмерных моделей территорий.

На стадии определения объектов, намеченных для раскопок, используется высокоточная наземная съемка местности с помощью спутниковых приемников с созданием ЦМР и 3D-модели местности.

На стадии раскопок обеспечивается координирование мест обнаружения артефактов, нанесение их на соответствующее слою, классификация и оформление в условных знаках, составление описания находки.

Главными достоинствами методики является то, что обеспечивается комплексный подход к изучению археологических памятников. Создание всех материалов выполняется в единой общедоступной системе координат, что обеспечивает изучение объекта в любом сочетании материалов съемки. Все процессы по обработке ДДЗ, материалов аэросъемки, построения фотопланов, карт, ЦМР и 3D-моделей рельефа выполняется в одной цифровой фотограмметрической системе PHOTOMOD. Обработка спутниковых измерений производится в ПО GrafNav/GrafNet. Продукция, созданная в этих программах, может использоваться для трехмерной реконструкции памятников в ПО – AUTOCAD, ARCHICAD.

Предложенные методические приемы позволяют, во-первых, точно привязать ар-

хеологические комплексы (как известные, так и вновь найденные) к местности и создать ландшафтную модель территории, в которой эти объекты сформировались, функционировали и стали археологическими. Во-вторых, созданная ландшафтная модель и точная детальная съемка рельефа дают возможность определить планиграфию археологического объекта с выявлением структурных особенностей (рвы, ямы, грабительские шурфы, раскопанные ранее площади) и, что самое важное, границ археологического памятника. Это существенно облегчает задачи по постановке археологического объекта на учет в охранные организации и выводу территории памятника из хозяйственного использования. В-третьих, выявление планиграфических особенностей памятника позволит выбрать оптимальное место для проведения археологических исследований и точно привязать границы раскопа к местности с указанием координат реперных точек. При долговременном исследовании памятника наличие этих координат поможет точной прирезке новых площадей для раскопок. В-четвертых, создание ЦМР, помещение на нее границ раскопа и возможность послойной фиксации в пределах раскопа найденных артефактов и сооружений создаст условия для выхода на следующий уровень построения реконструкций, связанных с моделированием облика раскопанных объектов, их взаимосвязи, что позволит решать уже чисто исторические и социокультурные задачи.