

Ю.А. Васильева, А.А. Дудко ✉

Институт археологии и этнографии СО РАН
Новосибирск, Россия
E-mail: a-dudko9@mail.ru

Применение фотограмметрии при проведении археологических исследований на территории Сибири (по результатам работ в 2018–2021 годах)

Одним из средств сохранения и изучения объектов культурного наследия является аэрофотосъемка с использованием беспилотных воздушных судов в совокупности с комплексом фотограмметрических работ. В статье приводятся сведения о трехмерном моделировании территорий различных объектов археологического наследия, расположенных в Уральском и Сибирском федеральных округах Российской Федерации. Основные цели фотограмметрии – визуализация состояния территорий, занимаемых объектами археологического наследия, и анализ элементов рельефа современной поверхности, документирование археологических раскопок. В статье лаконично описаны оперативно-производственные цепочки действий при проведении археологических полевых работ – разведок и раскопок, кратко охарактеризованы научные результаты фотограмметрических работ на обследованных памятниках археологии. Кроме того, представлены основные недостатки методики фотограмметрии с использованием снимков, полученных при помощи беспилотных воздушных судов, вызванные несовершенством программного обеспечения и результатами аэрофотосъемки. В результате трехмерного моделирования создается визуальный объемный образ территории объекта археологии. Данные фотограмметрии использовались на практике как в ходе полевых работ (мониторинг технического состояния памятников археологии, определение пространственных характеристик элементов рельефа на территории объекта), так и в процессе подготовки научной отчетной документации (корректировка элементов топографического плана, планирование мероприятий по обеспечению сохранности объектов археологического наследия; документирование раскопа, его элементов, стратиграфических и планиграфических разрезов, конструкций, сооружений и т.д.). Развитие технологий трехмерного моделирования способствует получению более качественной информации об исследуемых объектах, на сегодняшний день это один из надежных и простых способов визуализации объектов культурного наследия.

Ключевые слова: объект археологического наследия, фотограмметрия, полигональная модель, ортофотоплан, беспилотное воздушное судно.

Yu.A. Vasileva, A.A. Dudko ✉

Institute of Archaeology and Ethnography SB RAS
Novosibirsk, Russia
E-mail: a-dudko9@mail.ru

Application of Photogrammetry in Archaeological Research in Siberia (Based on the Results of Work in 2018–2021)

One of the means to preserve and study cultural heritage objects is aerial photography by unmanned aircrafts combined with a complex of photogrammetric techniques. The article provides data on 3D-modeling of the territories of various archaeological heritage objects located in the Ural and Siberian federal districts of the Russian Federation. The main goals of photogrammetry are visualization of the state of areas with such objects, analysis of relief elements of the modern surface, and documentation of archaeological excavations. The article concisely describes the chaîne opératoire – operational and production chains of actions during archaeological field work – inspection and excavation and briefly describes the scientific results of photogrammetric work at the surveyed archaeological sites. In addition, the main disadvantages of the photogrammetry technique when using images taken by unmanned aircraft caused by the imperfections of the software and at times the unsatisfactory results of aerial photography are presented. With the help of three-dimensional modeling, we can create a visual 3D image of the territory of an archaeological site. Photogrammetry data were used in practice, both during

field work (monitoring the technical condition of archaeological objects, determining the spatial characteristics of relief elements on the site), and in the process of writing various scientific reports (correcting elements of the topographic plan, planning measures to ensure the preservation of archaeological heritage objects; keeping records of a dig site and its sections, stratigraphic and planigraphic profiles, constructions, structures, etc.). The development of 3D-modeling technologies contributes to obtaining more precise information about the objects under study; currently it is one of the most reliable and simple ways to visualize cultural heritage objects.

Keywords: *archaeological heritage object, photogrammetry, polygonal model, orthophotoplane, unmanned aircraft.*

Объекты археологического наследия являются материальным капиталом национальной культуры, и задача его сохранения стоит перед всем российским обществом, а не только перед археологами, историками, антропологами и т.д. В современном мире существует множество факторов, угрожающих разрушением или уничтожением памятникам археологии, как выявленным, так и не известным еще науке на сегодняшний день. Одним из средств сохранения и изучения памятников археологии, прочно укрепившимся в инструментарии специалистов-археологов, является аэрофотосъемка с использованием беспилотных воздушных судов в совокупности с комплексом фотограмметрических работ.

В полевые сезоны 2018–2021 гг. авторы статьи, в рамках выполняемых разведок и раскопок, производили аэрофотосъемку территорий различных объектов археологии, расположенных в Уральском и Сибирском федеральных округах Российской Федерации с созданием для каждого из них пакета электронных файлов-документов, основными визуальными компонентами которого являются полигональная модель, цифровая модель местности и ортофотоплан.

Основные цели таких работ – визуализация состояния территорий, занимаемых объектами археологического наследия и анализ элементов рельефа современной поверхности, документирование археологических раскопок.

За 4 полевых сезона было обследовано 23 объекта.

1. Новосибирская область:

– Стоянка Сарапулка – полученный в ходе археологических раскопок комплекс фотограмметрических данных, вкупе с результатами раскопок, свидетельствует о кратковременных эпизодах посещения стоянки;

– Курганный могильник Заречно-Убинское-1 (раскоп 2019 г.) – основываясь на цифровой модели рельефа, стало возможным детально зафиксировать слабовыраженные характеристики курганной насыпи до начала исследования;

– Стоянка Волчья Грива – комплекс фотограмметрических данных позволяет существенно дополнить и детализировать топографический план земельного участка, занятого стоянкой, и визуализировать современное состояние объекта при со-

ставлении проектных решений предполагаемой музеефикации.

2. Кемеровская область – Кузбасс. Стоянка Тайлеп 4–8, Стоянка Зеленый Луг 2, 3, Стоянка Сарбала 3а, Сарбалинская стоянка (она же Стоянка Сарбала 1) – все эти объекты были выявлены в 2021 г. и попадают в зону хозяйственного освоения угледобывающими компаниями региона. Полученные в ходе реализации программы трехмерного моделирования территорий стояночных комплексов данные служат верифицируемым источником для разработки проектов мероприятий по сохранению объектов культурного наследия и позволят наглядно демонстрировать проектные решения перед заказчиками работ.

3. Красноярский край. Стоянка «Станция Лозичная», стоянка «Лагерь «Чайка» – объекты располагаются в зоне расширения железной дороги, данные трехмерного моделирования были использованы при подготовке топографических планов и разработке проектов мероприятий по обеспечению сохранности этих памятников.

4. Республика Хакасия:

– «Абакан-15. Одиночный курган» – по результатам трехмерного моделирования детально охарактеризовано современное состояние погребальной надмогильной конструкции и прилегающей территории, данные использовались при разработке проекта мероприятий по обеспечению сохранности кургана;

– «Могильник Казановка-10» – фотограмметрические работы проводились на ряде участков памятника, с целью детальной фиксации археологизированных объектов (ям, сооружений, скопленных камней и т.д.) и последующим использованием этих данных в подготовке научной отчетной документации.

5. Ханты-Мансийский автономный округ – Югра (на всех исследованных объектах фотограмметрические работы проводились как на этапе фиксации современной поверхности, так и в ходе раскопок):

– селище Кулунигый 5 (раскоп 4, 2019 г.) – по материалам фотограмметрии производилась фиксация, составление чертежей и описание археологизированных сооружений;

– группа впадин Кулунигый 64 – совокупность полученных данных трехмерного моделирования позволила наглядно демонстрировать погребальный характер объекта и локализовать распространение могильного поля;

– группа впадин Кулунигый 66 – данные трехмерного моделирования позволили детально охарактеризовать и визуализировать состояние внешнего вида археологизированных сооружений (ям-ловушек) на момент раскопок, серия планиграфических разрезов, выполненных по мере разбора отложений в раскопе, демонстрирует изменчивость пространственных и метрических характеристик этих сооружений;

– поселение Кулунигый 71 – комплекс цифровой документации позволяет охарактеризовать динамику освоения мысовидного участка террасы, выявлять последовательность естественных нарушений и смещения рыхлых отложений в пространстве;

– группа впадин Кулунигый 72 – данные фотограмметрии использовались при разработке проекта мероприятий по обеспечению сохранности объекта археологического наследия, ортофотопланы использовались для составления научной отчетной документации;

– могильник Кулунигый 73 – данные трехмерного моделирования позволили визуализировать состояние внешнего вида объекта, по материалам фотограмметрии производилась фиксация, составление чертежей и описание археологизированных сооружений.

6. Ямало-Ненецкий автономный округ. «Стоянка Сабрявпензя» – объект находится в зоне строительства нитки магистрального газопровода. Данные трехмерного моделирования были использованы при подготовке топографического плана, подготовке научной отчетной документации и разработке проектов мероприятий по обеспечению сохранности стоянки.

На выполнение разовых полетов воздушных судов массой 0,25–30 кг берется соответствующее разрешение в Федеральном агентстве воздушного транспорта (можно оформить через портал *Госуслуги*). Кроме того, на рынке представлены воздушные суда массой менее 0,25 кг, не требующие специальных разрешений, но и проигрывающие по качеству съемки.

Производственно-оперативная цепочка при съемке состоит из нескольких этапов.

На первом этапе выполняется облет обследуемой территории с использованием беспилотного воздушного судна (в нашем случае использовались квадрокоптеры DJI Phantom 4 Professional и Mavic 2 Zoom Pro со стандартными объективами, предварительно откалиброванными). Фотографическая съемка велась в 2–4 проекциях в плановом режиме (камера

направлена строго вниз), дополнительно производилась съемка под произвольным углом. Разрешение съемки от 1,28 мм/пикс до 2,47 см/пикс. Частота снимков с шагом перекрытия 40–60 %. Средняя высота полета – 50–70 м над современной дневной поверхностью, в некоторых случаях до 100 м. Позиционирование воздушного судна определяется в системе координат WGS-84, привязка к региональной системе координат производилась в зависимости от целесообразности. Суммарная дисторсия на первичном разведочном этапе археологических работ не имеет существенного значения, при проведении раскопочных работ увязка производилась по контрольным опорным точкам (маркерам), снятым в местной системе координат при помощи электронного тахеометра или двухчастотного GPS-приемника. Использовались как самостоятельно изготовленные маркеры (полотно белого цвета с центровкой в виде перекрестья, размерами 0,5 × 0,5 м или 1 × 1 м), так и стандартные, предлагаемые программой Agisoft PhotoScan (металлическая пластина с графическим и цифровым кодом, размерами 0,045 × 0,045 м или 0,2 × 0,2 м). Размерность маркеров зависит от масштаба производимой съемки.

На следующем этапе выполнялась пакетная обработка массива данных в программе Agisoft Metashape Professional (ранее PhotoScan). Предваряют процедуру выравнивание и оптимизация камер (фотографий). На основе полученной съемки строится плотное облако точек, затем выстраиваются карта высот, полигональная модель, цифровая модель местности и ортофотоплан [Усманов, Гайнуллин, Хомяков, 2018; Цзя Сяобин, 2017; Чжоу Чжэньюй, 2017]. В результате трехмерного моделирования создается визуальный объемный образ территории объекта археологии. Экспорт полученных данных возможен в различные форматы – от JPG до KMZ.

Список задач, которые можно выполнять на основе данных аэрофотосъемки в совокупности с комплексом фотограмметрических работ, значителен, приведем некоторые из них:

– корректировка плановых элементов топографического плана;

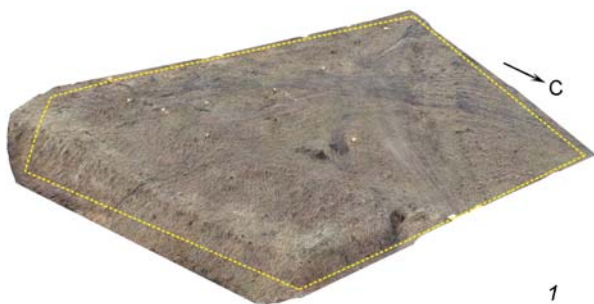
– определение пространственных характеристик элементов рельефа объекта археологии и археологизированных сооружений;

– использование полученных изображений для качественного описания территории объекта археологического наследия и его элементов;

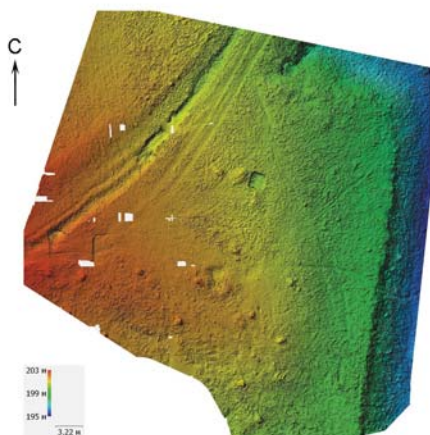
– ландшафтно-топографическая характеристика территории объекта археологического наследия;

– мониторинг технического состояния памятников археологии во временной динамике;

– планирование мероприятий по обеспечению сохранности объектов археологического наследия;



1



2

Рис. 1. Выявленный объект археологического наследия «Стоянка Сарапулка».

1 – ортофотоплан; 2 – цифровая модель рельефа.

– документирование раскопа, его элементов, стратиграфических и планиграфических разрезов, конструкций, сооружений и т.д.

Тем не менее, данная технология, хоть и имеет уже повсеместное распространение в археологии, имеет ряд недостатков, проигрывая лазерному сканированию. Перечислим основные:

– искажение высот, габаритов и формы зданий на открытой местности [Хрущ, 2018];

– отсутствие точек рельефа и текстур под растительностью;

– проявления «эффекта колодца» (в стесненных участках без возможности качественного стереомоделирования коррелятор не создает облако точек) [Рыльский, Калинин, 2017];

– отсутствие данных или некорректное отображение высоких элементов с малой площадью в основании (столбы, вышки и т.д.);

– искажение формы и шум облака точек;

– принцип корреляции в программных продуктах для аэрофотосъемки не позволяет отображать резкие перегибы рельефа [Михеева, Ялтыхов, Парадня, 2021].

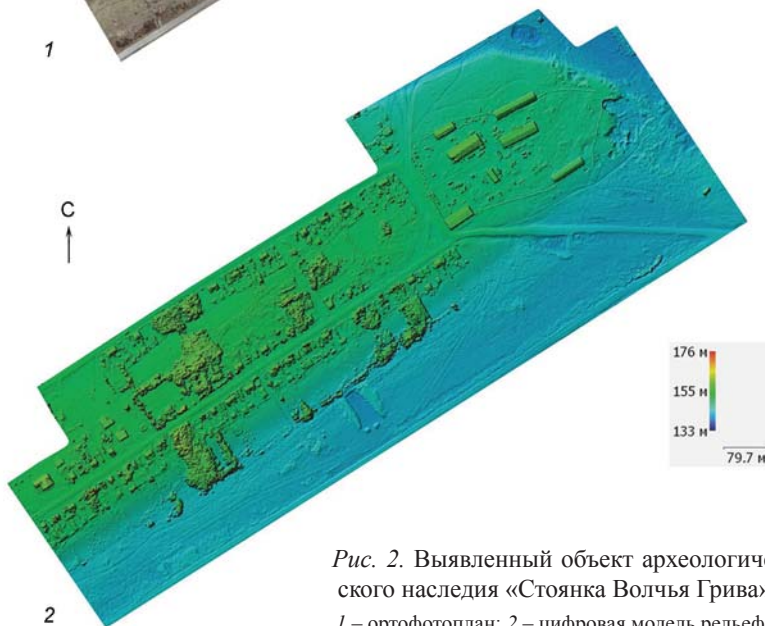
Таким образом, данные аэрофотосъемки с комплексом фотограмметрических работ не могут заменить полноценную топографическую съемку территории, но могут использоваться в качестве подосновы для ее подготовки.

Документирование раскопа и его частей является отдельной областью применения трехмерного моделирования и ортотрансформирования снимков. В оперативно-производственную цепочку добавляются следующие этапы:

– перед фотографической съемкой планиграфического или стратиграфического разреза на его поверхности размещаются контрольные точки (мар-



1



2

Рис. 2. Выявленный объект археологического наследия «Стоянка Волчья Грива».

1 – ортофотоплан; 2 – цифровая модель рельефа.

керы), при помощи геодезического оборудования определяются их координаты в используемой системе координат;

– после загрузки в Agisoft Metashape Professional фотографий (камер) производится поиск маркеров и подтверждение неопознанных программой маркеров;

– после выравнивания и оптимизации камер, построения плотного облака точек производится импорт координат с отбраковкой по мере необходимости маркеров, дающих недопустимую погрешность;

– после построения ортофотоплана из него вырезается и экспортируется требуемый полигон в заданной системе координат в программы для создания растровых чертежей, например AutoCAD, IndorCAD и т.д.

Одними из главных преимуществ фотограмметрии является возможность повторного обращения к полученному визуальному объемному образу объекта и верификация результатов работы на любом ее этапе.

Развитие технологий цифровой фотосъемки с использованием беспилотных воздушных судов, программ автоматической генерации 3D-точек и цифрового ортотрансформирования снимков способствует получению более качественной информации об исследуемых объектах, представлению результатов работ общественности и, как следствие, сохранению и изучению историко-культурного наследия.

Благодарности

Работа выполнена по проекту НИР ИАЭТ СО РАН № 0264-2021-0008.

Список литературы

Михеева А.А., Ялтыхов В.В., Парадня П.Ф. Создание ортофотоплана в программе Agisoft PhotoScan // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия Ф. Строительство. Прикладные науки. – Полоцк: Изд-во Полоцк. гос. ун-та, 2021. – № 8. – С. 13–20.

Рыльский И.А., Калинин И.В. Сравнение пригодности данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА для обеспечения проектных работ // ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий в условиях глобальных изменений климата. Материалы Международной конференции Южно-Сахалинск (Россия), Сеул (Республика Корея), Вашингтон (США) 26 июня – 7 июля 2017 г. – М.: Изд-во Москов. гос. ун-та, 2017. – Т. 23. – № 3. – С. 31–46.

Усманов Б.М., Гайнуллин И.И., Хомяков П.В. Комплексная оценка современного состояния территории

Болгарского городища (Татарстан, Россия) // Поволжская археология. – Казань: Фэн, 2018. – № 2 (24). – С. 326–341.

Хрущ Р.М. Фотопланы (ортофотопланы): сущность, содержание и развитие методов, способов и средств трансформирования снимков // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – М.: ИД Медиа Паблшер, 2018. – Т. 10. – № 3. – С. 94–102.

Цзя Сяобин Применение информационных технологий в региональных археологических исследованиях // *Universum Humanitarium*. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. ун-та, 2017. – № 1. – С. 144–164.

Чжоу Чжэньюй Применение технологий трехмерной реконструкции в палеолитической археологии // *Universum Humanitarium*. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. ун-та, 2017. – № 1. – С. 120–143.

References

Chzgou Chzgeniyi Primenenie tekhnologiy trekhmernoy rekonstruktsii v paleoliticheskoj arkheologii. In *Universum Humanitarium*. Novosibirsk: Novosibirsk State Univ. Press, 2017, no 1. P. 120–143. (In Russ.).

Khrush R.M. Airplans (orthophotomaps) essence, content and the development of methods, ways and means of photo transformation. In *High technologies in Earth Space research*. Moscow: ID Media Publ., 2018. Vol. X, no 3. P. 94–102. (In Russ.).

Mikheeva A.A., Yaltykhov V.V., Paradnya P.F. Creation of orthophotoplan in Agisoft PhotoScan software. In *Vestnik Polozkogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F. Stroitelstvo. Prikladnye nauki*. Polozk: Polozk State Univ. Press, 2021. Vol. 8. P. 13–20. (In Russ.).

Rylskiy I.A., Kalinkin I.V. Svravnenie prigodnosti dannyh vozduchnogo lazernogo scanirovaniya i aerofotosiemki s BPLA dlya obespecheniya proektnyh rabot. In *Conferencia InterCarto/InterSIG. Proceedings of the International Conference GI support of sustainable development of territories in conditions of global climate change*. Moscow: Moscow State Univ. Press, 2017. Vol. XXIII, no 3. P. 31–46. (In Russ.).

Tszhya Syaobin Primenenie informatsionnykh tekhnologiy v regionalnykh issledovaniyakh. In *Universum Humanitarium*. Novosibirsk: Novosibirsk State Univ. Press, 2017, no 1. P. 144–164. (In Russ.).

Usmanov B.M., Gaynullin I.I., Khomyakov P.V. Kompleksnaya otsenka sovremennogo sostoyaniya territorii Bolgarskogo gorodisha (Tatarstan, Russia). In *Povolzgsкая arkheologiya*. Kazan: Fen Publ., 2018, no 2 (24). P. 326–341. (In Russ.).

Васильева Ю.А. <https://orcid.org/0000-0003-4955-2749>

Дудко А.А. <https://orcid.org/0000-0003-2253-5658>