

УДК 528.4+902.26

doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.314-330

НЕСТРОГАЯ ФОТОГРАММЕТРИЯ КАК БАЗОВЫЙ МЕТОД ДЛЯ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ПЛАНОВ РАСКОПА НА ВСЕХ УРОВНЯХ ВСКРЫТИЯ

А.В. Старовойтов, И.Ю. Чернова

Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия

Аннотация

В статье обоснована необходимость использования метода нестрогой фотограмметрии для создания высокоточных планов археологических раскопов на всех уровнях вскрытия. Проанализирована информативность стандартных методов нестрогой фотограмметрии. Предложены новые методы съемок, оценена их эффективность, даны рекомендации по индивидуальному использованию новых методов, а также по их комплексированию друг с другом и со стандартными методами. Перечислены требования к используемому оборудованию, кроме того, даны рекомендации по его эксплуатации с целью получения качественных 3D-реконструкций и ортофотопланов. Предлагаемая методическая база в недалеком будущем должна стать основой инструкций по организации и проведению археологических раскопок.

Ключевые слова: нестрогая фотограмметрия, наземная фотограмметрия, методика, метод, археологический раскоп, Болгар

Введение

Послойные планы раскопов являются одними из основных результатов проведения полевых археологических исследований. Набор планов – это не только графическая часть отчетной документации, но и модель вскрытых объектов, объективно отражающих образ жизни людей, живших когда-то на исследуемой территории.

Результаты применения устоявшихся методов фиксации слоев раскопа (заключающихся преимущественно в ручных зарисовках и фотографировании) не соответствуют современным требованиям, предъявляемым к точности выходных материалов, а также крайне неудобны для последующего анализа и обработки. Отсутствие современных методик планирования и проведения раскопочных работ вынуждает наиболее восприимчивых к техническим новинкам археологов искать свои способы применения современного геодезического оборудования и геоинформационных систем [1–3], но принципиально ситуация не меняется. До сих пор основным методическим пособием, наиболее полно описывающим процесс ведения раскопок, является книга Д.А. Авдусина «Полевая археология СССР» (М.: Высш. шк., 1980). Очевидно, что методы изучения и фиксации материалов раскопок, изложенные в этой книге, давно морально и технически устарели [4].

Даже если археологи при проведении раскопочных работ используют современное геодезическое оборудование, «ручная» методика создания планов остается прежней. В результате при совмещении данных разных пластов сплошь обнаруживается несогласованность форм и размеров картографируемых объектов: границы объектов раскопа «разъезжаются», меняются ориентация, линейные размеры, площадь объектов [5].

В камеральных условиях границы объектов можно подогнать друг к другу (но далеко не во всех случаях). Ценой такой подгонки будет потеря качества данных, потеря части информации об объектах раскопа, и, как следствие, снижение достоверности полученных результатов. При этом общая ошибка положения фиксируемых элементов раскопа накапливается по мере вскрытия.

К перспективному методу поэтапной фиксации объектов раскопа относится фотограмметрия [6, 7] и, как наиболее бюджетный вариант этой технологии, наземная фотограмметрия.

Анализ публикаций за последние 10 лет показывает, что археологами фотограмметрия используется эпизодически и исключительно для задач визуализации исследуемых объектов. В отчеты о раскопках фотограмметрические материалы включаются лишь для демонстрации результатов технологии, рассматриваемой в качестве экспериментальной, либо включаются как результат единичной съемки всего раскопа на уровне материка [8] или как результат съемки отдельных объектов внутри раскопа [9, 10].

Такого рода материалы, конечно, необходимы для демонстрации результатов научной деятельности, но практический смысл фотограмметрии пропадает. Отчетная документация по-прежнему составляется с использованием «ручных» методов фиксации материала раскопок; теряются все преимущества, которые несет технология как для заказчика, так и для исполнителя работ.

Мнение, что фотограмметрия дает менее детальные результаты по сравнению с лазерным сканированием, является заблуждением [11]. Правильный подход к проведению съемки обеспечивает результаты, которые превосходят по качеству материалы лазерного сканирования [12]. А главным доводом в пользу использования фотограмметрии является низкая стоимость приобретаемого оборудования.

Нами предлагаются новые способы составления высокоточных планов раскопов с использованием нестрогой фотограмметрии, которые в недалеком будущем должны стать основными технологическими приемами при организации и проведении разведочных и раскопочных работ.

1. Площадь и объекты исследования

Разработка и внедрение новых методов фиксации пространственных данных с использованием фотограмметрии проводились на раскопках территории Болгарского городища – уникального памятника Средневековья, важного центра древней тюрко-мусульманской цивилизации Поволжья. Городище расположено вблизи слияния двух крупнейших рек Европы – Волги и Камы (49°3'18,546"E, 54°58'41,125"N) (рис. 1). В настоящее время древнее городище находится под охраной ЮНЕСКО и входит в состав Болгарского государственного историко-архитектурного музея-заповедника (Татарстан, Россия).

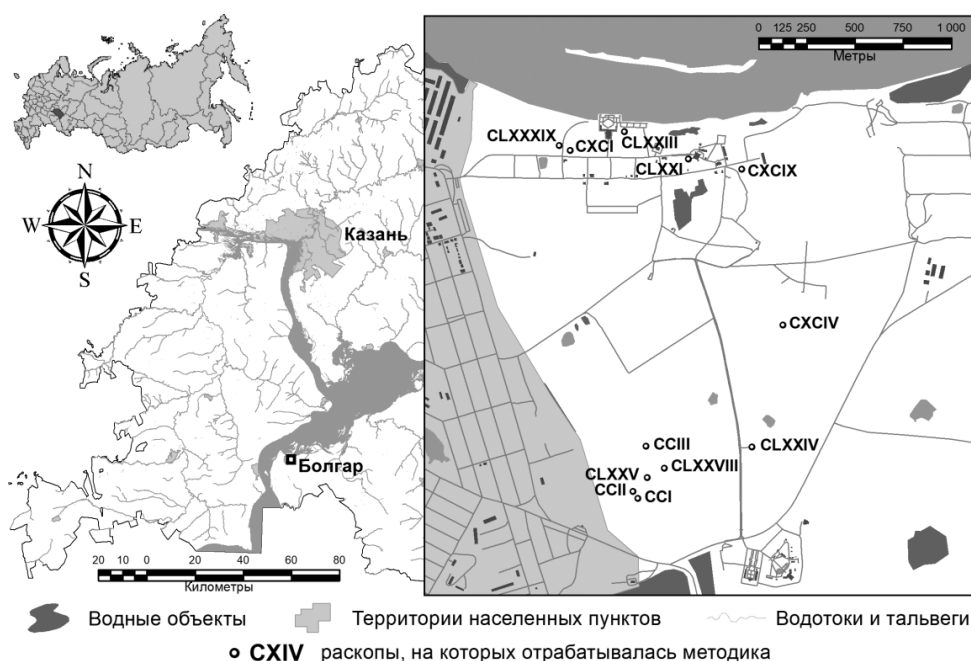


Рис. 1. Положение исследуемой территории и целевых раскопов

Объектами наземной фотограмметрической съемки на территории заповедника являлись сохранившиеся культовые здания и сооружения, объекты археологической консервации. Особое внимание уделялось фиксации археологических раскопов и вскрытых в них конструкций, ям различного назначения, а также находок.

2. Традиционные техники наземной фотограмметрической съемки

На начальных этапах использования любой новой технологии пользователь сталкивается с трудностями, связанными с получением качественного конечного продукта. Зачастую неправильный подход приводит к разочаровывающим результатам и отказу от использования технологии.

Бессистемная съемка объектов с целью трехмерной реконструкции не имеет шансов на получение качественного результата при фотограмметрической обработке. Для минимизации возможных ошибок уравнивания, предупреждения появления «теневых зон» разработчики программного обеспечения в области нестрогой фотограмметрии рекомендуют следовать определенным приемам и правилам [13]:

- 1) съемка должна проходить с различных точек;
- 2) площадь перекрытия соседних снимков должна быть более 50% получаемого кадра;
- 3) необходимо эффективно использовать кадр, чтобы максимально исключить пространство, которое не относится к объекту съемки;
- 4) избыток фотографий предпочтительнее, чем их недостаточное количество;
- 5) при съемке нужно ориентироваться в центр объекта как в случае одиночных изолированных объектов, так и при съемке интерьеров.

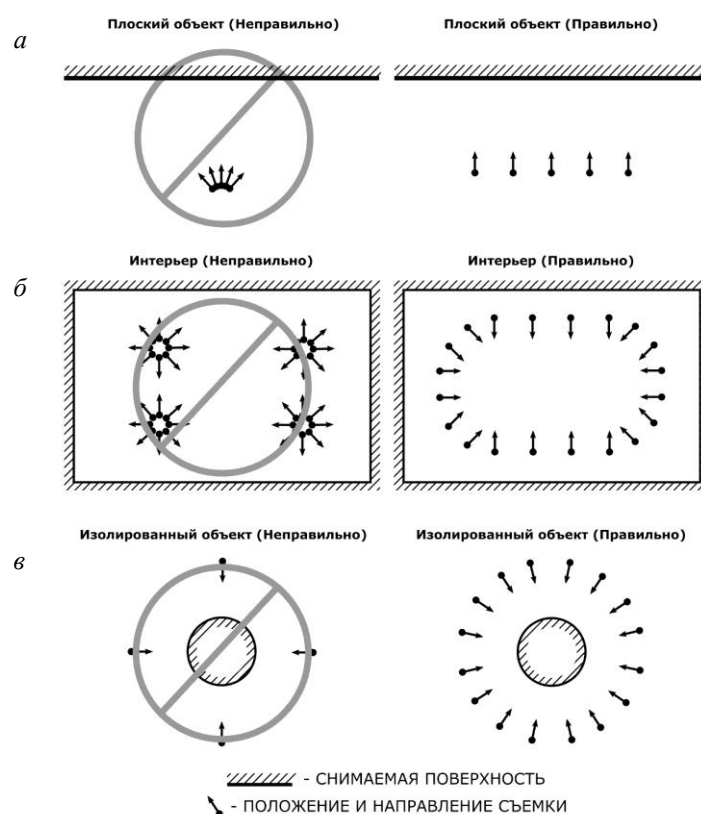


Рис. 2. Сценарии съемки из руководства Agisoft Photoscan [13]: а) съемка плоского объекта (например, стены); б) съемка интерьеров; в) съемка изолированных предметов (находок, скульптур) или сооружений (зданий)

Первые три пункта универсальны для всех видов фотограмметрической съемки. Способы съемки отдельных предметов и интерьеров, предлагаемые разработчиками Agisoft Photoscan, представлены на рис. 2.

В контексте настоящей статьи будем называть вышеперечисленные правила и приемы традиционными.

Практика показывает, что перечисленных правил достаточно, чтобы получить приемлемый результат, который будет использоваться в демонстрационных материалах либо компьютерных играх. Любые искажения или полное отсутствие изображения в какой-либо части объекта можно заретушировать, а низкое разрешение текстуры искусственно восстановить, но реальная информация будет потеряна [14].

В случае съемки, требующей геодезической точности, этих рекомендаций недостаточно, особенно в отношении таких специфических объектов, как археологический раскоп. Необходимы альтернативные подходы к выполнению наземной съемки, которые бы обеспечивали качественный результат, как для построения трехмерного каркаса модели, так и для получения детального ортофотоплана.

Избыточное количество фотографий также не является панацеей от избавления проблем, возникающих при обработке. Большое количество проекций,

приходящихся на отдельную область объекта, не гарантирует исчезновения областей модели с отсутствием реконструкции, а немалый объем фотографий сцены приведет к значительному увеличению времени обработки, ошибкам, связанным с исчерпанием ресурсов системы.

Основную технику, предлагаемую разработчиками наземной нестрогой фотограмметрии, принято называть методом центральной оси (МЦО) [15]. Она заключается в плановой съемке вокруг воображаемой оси объекта с шагом 5–10° (рис. 2, в). В случае съемки интерьера в качестве оси выступает центральная часть помещения (рис. 2, б).

В археологии МЦО используется при съемке объектов, у которых в плане большинство элементов равноудалены от центра объекта, а также для небольших по размеру предметов. К таким объектам относятся небольшие сооружения: курганы, мавзолеи, памятники, столбы и т. д. Другими примерами могут служить различного вида находки: керамическая посуда и ее элементы, отдельные мослы и черепа, предметы личного пользования, ювелирные изделия и т. п. Такие объекты являются практически симметричными, а в качестве центральной оси выступает ось симметрии объекта.

В пределах раскопа МЦО применим к полностью вскрытым изометричным конструкциям, таким как фундамент сооружений, погребальные камни, горны и печи. Этот метод практически лишен ошибок уравнивания, так как для каждой точки в фотосцене существует избыток числа проекций. Но МЦО совершенно не годится для площадной съемки. Это связано с особенностями фотографий, получаемых при перспективной наземной съемке.

Из-за того, что съемка проводится под углом (рис. 3), пространственное разрешение получаемого изображения является переменным: чем дальше находится участок поверхности (например, поверхности пласта или стенки) от точки съемки (от фотографа), тем меньше разрешение изображения (рис. 3, а).

Соответственно, генерируемые точки сети сгущения располагаются реже, а текстура и ортофотоплан в результате становятся смазанными (рис. 3, б).

Практика показывает, что МЦО с переменным успехом можно снимать объекты площадью до 50 кв. м и высотой до 2.5 м. Чтобы повысить качество материала (детализировать области, отснятые с малым разрешением) исследователи делают дополнительные снимки. Но, как правило, съемку они ведут бессистемно: точки и направления съемки выбирают хаотично, по субъективным соображениям их целесообразности, что в итоге крайне редко приводит к приемлемым результатам.

Для фиксации вертикальных стенок раскопов археологи используют метод параллельной съемки (МПС) (рис. 2, а). Благодаря субортогональному положению оси съемки к вертикальной поверхности раскопа метод позволяет избежать нежелательных искажений геометрии и дает высокое качество текстуры в пределах одной стенки раскопа. Но если совершать последовательный обход всех стенок раскопа, параллельная съемка не гарантирует корректной реконструкции единой сцены. Часто появляются разрывы модели, искажения общей геометрии раскопа как в плане, так и по высоте либо модель распадается на части, не образуя единый геометрический объект (рис. 4).

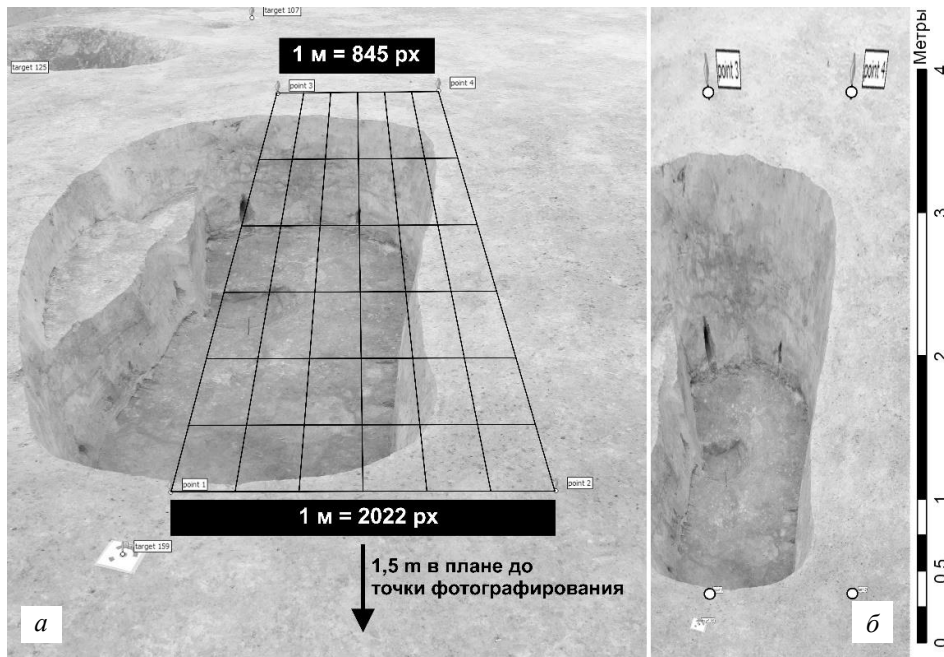


Рис. 3. Изменение разрешающей способности изображения с удалением от точки съемки: а) фотография из сцены фотограмметрического обмера раскопа ССП(202) (2014 г.) на уровне материка; б) результат перспективного преобразования фотографии в ГИС

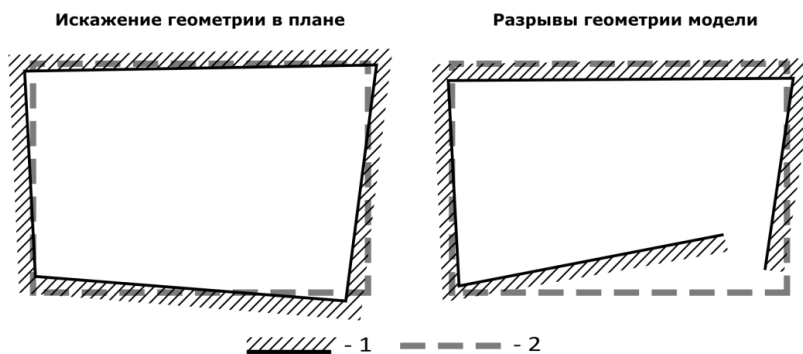


Рис. 4. Примеры искажений стенок раскопа, которые могут появиться при использовании метода параллельной съемки (1 – стенки виртуальной модели раскопа, полученные в случае некорректного выбора техники съемки; 2 – реальная геометрия раскопа в плане)

Мы предлагаем новые дополнительные методы проведения съемок на раскопах, которые можно успешно комбинировать с МПС и МЦО для достижения впечатляющих результатов.

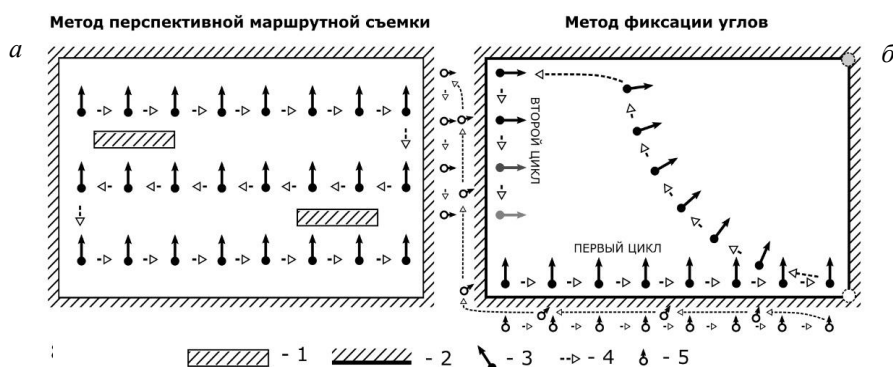


Рис. 5. Схемы проведения съемок по методу перспективной маршрутной съемки (а) и методу фиксации углов (б) (1 – объекты раскопа, 2 – снимаемая поверхность, 3 – положение и направление съемки внутри раскопа, 4 – направление перемещений оператора, 5 – альтернативный вариант съемки с бровки)

3. Новые методы наземной фотограмметрической съемки, рекомендуемые при проведении раскопок

В ходе полевых испытаний в сезоны 2012–2013 гг. на территории Булгарского городища А.В. Старовойтовым были разработаны, апробированы и внедрены следующие методы фотограмметрической съемки:

- 1) метод перспективной маршрутной съемки (МПМС);
- 2) метод фиксации углов (МФУ);
- 3) метод субортогональной съемки по периметру (МССП).

Метод перспективной маршрутной съемки (рис. 5, а) впервые был применен при съемке раскопа CLXXIV(174) (руководитель раскопа И.И. Елкина). Идея его применения пришла после ряда неудачных попыток использования стандартных техник как по отдельности, так и в комплексе. МПМС опирается на классическую геодезическую модель съемки местности с летательного аппарата, где для каждой точки существуют проекции не только со снимков одного маршрута, но и с параллельных маршрутов. Различие заключается в том, что ось объектива при съемке раскопа не направлена по нормали к земной поверхности, а ориентирована таким образом, чтобы захватить верхнюю кромку стенки. Еще одним важным отличием является то, что подобная серия снимков производится 4 раза: одна серия для каждой стороны раскопа.

Большим минусом данного метода является огромное количество фотоматериала для обработки. Это значительно увеличивает время вычислений и не позволяет производить обработку в полевых условиях. Несмотря на то что точность получаемой модели в десятки раз выше точности планов раскопов, построенных ручным способом, и даже превышает требуемую нормативную точность к построению планов [16], к сожалению, приходится признать, что с точки зрения эффективности МПМС не является наилучшим для съемки больших по площади раскопов.

МПМС идеально подходит для съемки отдельных погребений и небольших ям, форма которых близка к форме прямоугольника (рис. 6). В этом случае центральная часть объекта снимается ортогонально поверхности съемки, а боковые части снимаются под углом. Сначала оператор должен идти по верхней

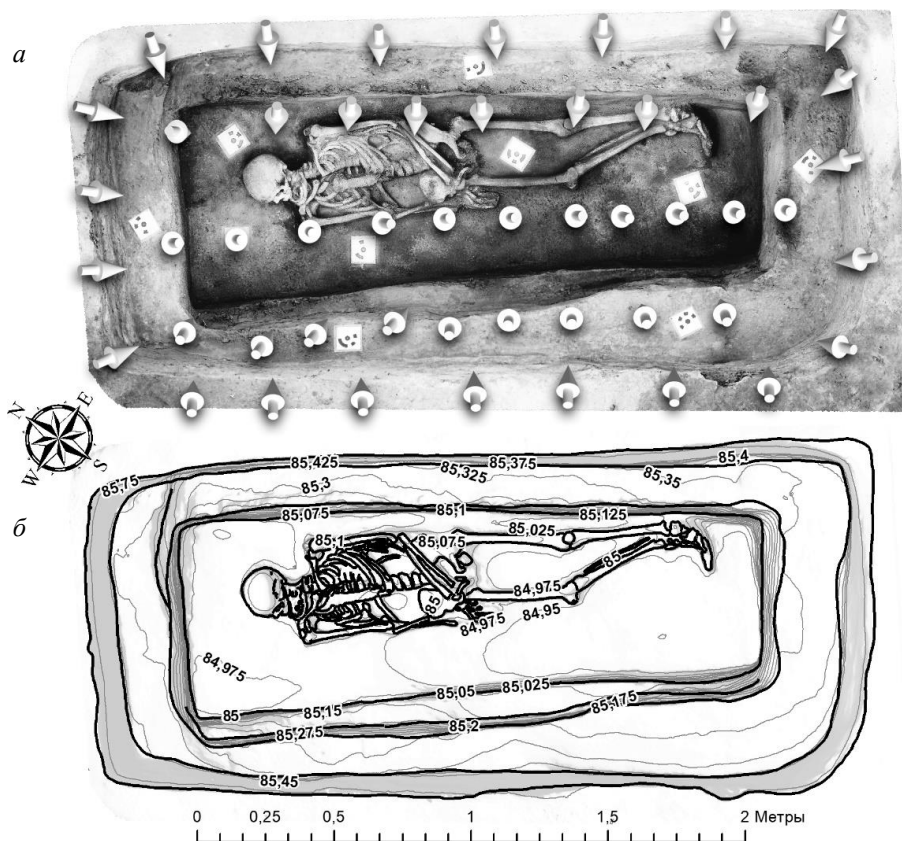


Рис. 6. Пример представления ортофотоплана (а) и векторной зарисовки останков человека. Изолинии и отмывка рельефа (б), полученные из ЦМР погребения № 3 раскопа ССП(202). Реконструкция выполнена методом перспективной маршрутной съемки. Болгарское городище, 2014 г. Объемными стрелками указаны местоположения камеры и направления съемки

бровке длинной стороны погребения или ямы и вести фотосъемку на вытянутых руках так, чтобы направление съемки было сверху вниз. Таким образом получается серия снимков для центральной части объекта. Затем оператор должен пройти еще 2 или 4 маршрута параллельно длинной стороне объекта (как показано на рис. 6, а), ориентируя камеру так, чтобы наклон оси камеры был 5–10° от нормали в сторону центральной части раскопа. Съемка, как правило, выполняется на вытянутых руках. Затем оператор должен пройти еще 2 маршрута вдоль коротких сторон погребения (рис. 6, а) ориентируя камеру так, чтобы наклон оси камеры был приблизительно 45° от нормали в сторону центральной части раскопа. Выставляя камеру таким образом, оператор за один раз охватывает более 60% поверхности погребения. Перекрывающиеся снимки, полученные с коротких сторон бровки, необходимы для выравнивания фотосцены в центральной части погребения. Результат фотограмметрической обработки погребения представлен на рис. 6, б.

Метод фиксации углов (рис. 5, б) представляет собой комбинацию МЦО и МПС. Фотографирование проводится субортогонально стенке раскопа или сооружения. При этом оператор перемещается у противоположной стенке, по дну

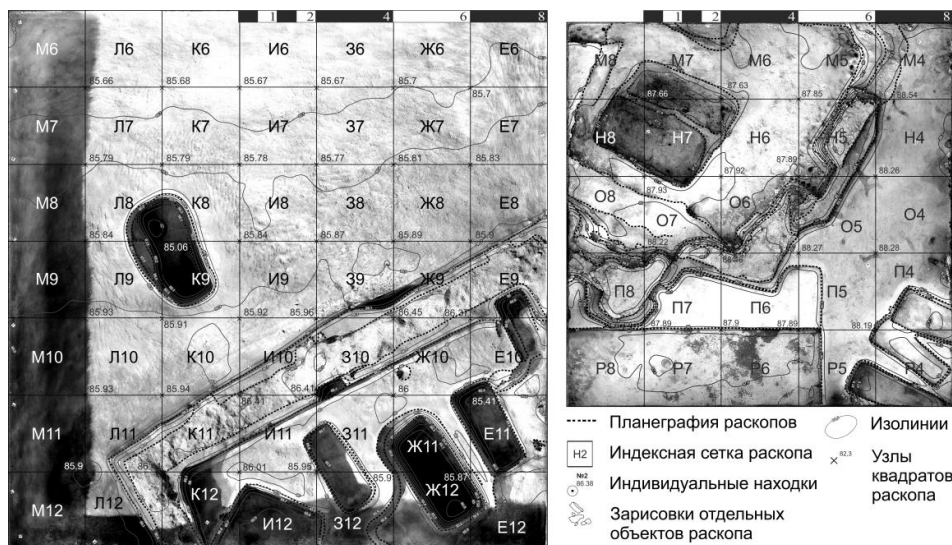


Рис. 7. Ортофотопланы, полученные методом фиксации углов, и планеграфия раскопов ССП(202) (слева) и ССП(203) (справа) на уровне материка. Болгарское городище, 2014 г.

раскопа. В этом случае обеспечивается широкий охват поверхности пласта с наименьшим влиянием перспективы на результат ортотрансформирования. Для перехода к следующей стенке проводится стыковочная съемка угла раскопа, на который вышел оператор в ходе съемки. Съемка угла проводится МЦО с шагом 18° (или 5 кадров на один угол). Цикл съемки замыкается на точке начального кадра. Следует отметить, что во многих случаях предпочтительно, чтобы оператор шел по бровке или борту раскопа. Перемещения по дну раскопа оправданы, если глубина раскопа составляет более 1.5 м или ширина бровки не позволяет продвигаться по ней без создания опасности обрушения стенки или падения оператора.

МФУ углов дает хороший результат при съемке небольших по площади раскопов (до 120 кв. м) или при съемке отдельных секторов при условии отсутствия специфических конструкций, требующих отдельной съемки. Он обеспечивает непрерывное наложение пар снимков, которые охватывают как стенки раскопа, так и поверхность пласта. При обработке фотосцены, полученной с использованием данной техники, исключена вероятность того, что сцена не будет уравнена. Более того, гарантировано, что ортофотоплан и 3D-модель получат высокую степень детализации (рис. 7).

Метод субортгональной съемки по периметру используется для исключения возможных искажений ортофотоплана вблизи верхней бровки раскопа или сектора раскопа. Съемка проводится по нормали к поверхности пласта. В этом случае оператор передвигается по борту сектора или раскопа и производит фотографирование сверху вниз. Шаг съемки должен обеспечивать перекрытие соседних кадров не менее 50%. Как правило, это требование обеспечивается съемкой каждого кадра через 1–2 шага оператора, что соразмерно 1–1.5 м. Цикл съемки замыкается в начальной точке фотографирования.

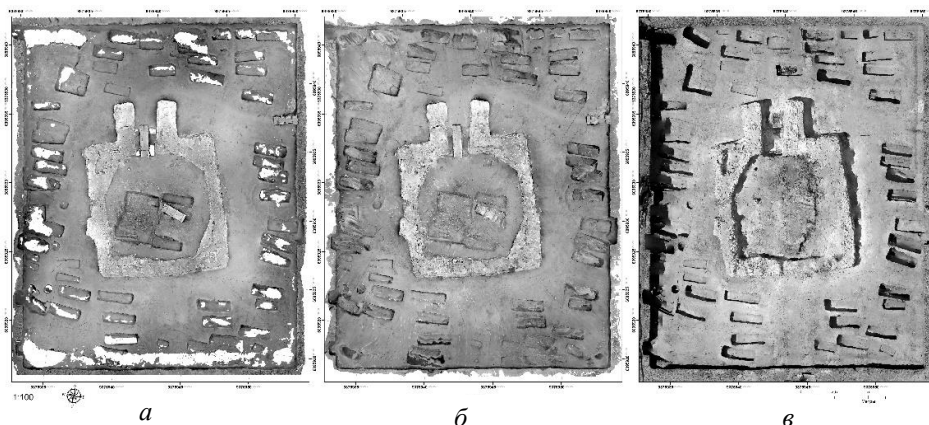


Рис. 8. Ортофотопланы раскопа CLXXIV(174) (руководитель раскопа И.И. Елкина), полученные с применением различного оборудования и методов: а) съемка с помощью мобильных устройств методом центральной оси; б) съемка зеркальным фотоаппаратом методом центральной оси; в) съемка зеркальным фотоаппаратом методом перспективной маршрутной съемки

На рис. 8 показаны ортофотопланы, полученные с применением различного оборудования и техник съемки. При съемке МЦО с использованием мобильных устройств (iPad 2) модель получается с «дырками»: из реконструкции исчезают части объектов, которые в момент съемки находились на значительном расстоянии от оператора. При использовании зеркальных фотоаппаратов участков с отсутствием реконструкции не наблюдается (благодаря высокому разрешению снимков и контролируемой обработке фотосцен). Но чем дальше фрагмент модели от точки съемки, тем больше геометрических искажений он содержит, а детальность ортофотоплана в таких местах резко снижается (изображение теряет четкие контуры). Наилучший результат был достигнут в случае применения МПМС, но обработка материала заняла трое суток.

4. Комплексование методов наземного фотограмметрического обмера при съемке раскопов, отдельных сооружений

Все рассмотренные методы фотограмметрической съемки можно использовать как самостоятельные техники при полевых археологических исследованиях. Но в зависимости от площади раскопа, глубины вскапывания и запросов к детализации отдельных объектов часто требуется комбинирование методов. При этом к методам, являющимся дополнительными, предъявляются менее жесткие требования, чем к основным.

Базовой техникой при фиксации пласта и его объектов на раскопе является МФУ. Он является своего рода каркасом для остальных техник.

Субортогональная съемка по периметру в комплексе с МФУ необходима при площади объектов более 50 кв. м. Она обеспечивает, с одной стороны, детализацию модели раскопа вблизи верхней бровки, с другой – позволяет зафиксировать реперные точки, участвующие в географической привязке плана раскопа и данных фотосцены. Если данную технику исключить из комплекса, форма модели раскопа не пострадает, но возможно искажение текстуры у бортов сектора.

Искажение текстуры, в свою очередь, означает потерю информации об объектах пласта, прилегающих к бровке.

С целью исключения «дыр» в реконструкции секторов или раскопов площадью более 100 кв. м при съемке неполнокадровыми камерами МФУ необходимо дополнить МЦО. В этом случае дополнительным методом проводится съемка центральной части сектора или раскопа. Причем нет необходимости проводить съемку тщательно, выдерживая шаг съемки в 5–10°. Достаточно сделать восемь кадров, равномерно покрывающих площадь сектора или раскопа.

При выходе на материк крайне важным является стратиграфическое описание стенок. В этом случае в комплекс фиксации необходимо включить МПС для фиксации стенок раскопа.

Выше было показано, что при уравнивании фотосцены, полученной МПС, часто возникают существенные искажения геометрии объектов (рис. 4). Поэтому его применение как самостоятельного метода не рекомендуется. Но, с другой стороны, метод позволяет с высокой степенью детализации зафиксировать вертикально ориентированные участки раскопа.

Таким образом полагаем, что комбинация МПС и МФУ даст отличный результат.

Для съемки отдельных объектов, линейные размеры которых в плане не превышают 4 м, а по высоте – 2 м, основным методом остается МЦО. Но он также может быть дополнен уточняющими техниками. При съемке МЦО часто теряются детали и структура сложных элементов конструкции (рис. 8, б). Это явление связано с неоптимальным использованием кадра в угоду охвата всего объекта разом. В таких случаях рекомендуется включать в комплекс параллельную съемку.

С небольшой модификацией перспективную маршрутную съемку можно использовать для съемки стен интерьеров различных сооружений и раскопов. Сначала оператор выбирает первую точку съемки и начинает перемещаться по дну раскопа параллельно одной из стенок. Камера ориентируется перпендикулярно стенке. Так как съемка осуществляется достаточно близко к объекту фотографирования, достаточная частота кадров равна 1–2 шагам оператора (или 1–1.5 м). Оператор должен следить за тем, чтобы кадр охватывал не только стенку, но и часть поверхности дна раскопа (полосу шириной приблизительно 40 см), примыкающей к стенке. Когда съемка одной стенки закончена, оператор может переходить к съемке другой стенки по тем же правилам, но предварительно, для связки изображений стенок, делает снимок угла, который образуют эти стенки. В данном случае одного кадра достаточно. Завершением съемки является возвращение оператора на начальную позицию.

Таким образом, комбинирование методов съемки позволяет решать задачи получения отличного по качеству и достаточного по количеству фотоматериала для всех возможных ситуаций, возникающих на раскопе.

Рекомендуемые методы фотограмметрической съемки для фиксации пластов раскопов, секторов раскопов, отдельных сооружений и иных объектов представлены в табл. 1.

Табл. 1.

Рекомендуемые методы фотограмметрической съемки для фиксации пластов раскопов, секторов раскопов, отдельных сооружений и иных объектов

Археологический объект	Размер, кв. м	Форма в плане *	Глубина/высота, м	Основной метод **	Дополнительные методы **	Примечания **
Раскоп/сектор раскопа	< 50	□ / □	< 0.5	МФУ	Не требуются	
			< 1.5		МССП	
			> 1.5		МССП МЦО	МФУ по дну раскопа
	50–100		< 1		МССП	
			> 1		МССП МЦО	
	100–500		< 1		МССП	
			> 1		МССП МЦО	
	> 500		< 1.5			
> 1.5						
Погребение	< 5	□ / □	< 1	МПМС	Не требуются	МПМС объекта на вытянутых руках
			> 1		МЦО	МЦО также отдельно для головы скелета
Яма		□ / □ / ○	< 1.5	МЦО	Не требуются	
			> 1.5		МПМС	
Конструкция (горны, печи, возложения)	< 5	□ / ○	< 2	МЦО	Не требуются	Съемка отдельных элементов барельефа снимается с максимально близкого расстояния МПМС
	2–10	□		МЦО	МПМС	

* □ – прямоугольная, □ – квадратная, ○ – круглая.

**Расшифровку аббревиатур см. по тексту выше

Заключение

Сведения, представленные в табл. 1, обобщают результаты многолетних опытных работ по использованию методов фотограмметрии для документирования раскопов. Эта таблица может быть использована в качестве начального руководства по планированию и проведению фотограмметрических обмеров на различных этапах раскопочных работ.

При составлении таблицы были учтены размер объекта и форма объекта. Предполагается, что при создании фотосцен используются полупрофессиональные фотокамеры (типа Nikon D300s или Canon EOS 550D). Съемка проводится одним оператором.

Опыт работ показал, что вышеперечисленные фотограмметрические методы при условии соблюдения технологии съемки и технологии обработки материалов позволяют получать отличные результаты.

Для географической привязки ортопланов раскопов и 3D-реконструкций необходимо применять современное геодезическое оборудование: GNSS-приемники и тахеометры. В этом случае точность привязки границ и квадратов раскопов будет составлять первые сантиметры по горизонтали и по глубине. Для обозначения реперных точек целесообразно использовать специальные маркеры, которые автоматически определяются программой обработки. Маркеры представляют собой графические коды с центральной точкой, определяющей положения маркера. Использование маркеров ускоряет процесс обработки фотосцен. Если соблюдать данные рекомендации, то конечный результат в виде планов раскопов будет полностью удовлетворять требованиям «Положения о порядке проведения археологических полевых работ (археологических раскопок и разведок) и составления научной отчетной документации от 27.11.2013. № 85» [15].

Необходимо отметить, что методы нестрогой фотограмметрии будут весьма полезны, если в распоряжении полевого отряда археологов нет высокоточного геодезического оборудования. В этом случае план раскопа разбивается вручную с помощью мерной ленты. Таким образом, линейные размеры раскопа известны. Положение реперов на углах раскопа или секторов раскопа не изменяется. Этих условий достаточно для построения ортофотоплана, цифровой модели рельефа и трехмерной модели для каждого пласта раскопа в локальной системе координат. Точность ортофотопланов пластов в этом случае будет ниже, чем в случае разбивки плана раскопа с помощью GNSS-оборудования, но много выше, чем точность планов, полученных с помощью ручной зарисовки.

Выбор программы для уравнивания фотосцен зависит от предпочтения и финансовых возможностей исследователя. Все модели археологических объектов, представленные в настоящей работе, были рассчитаны в Agisoft. Выбор программы был обусловлен низкой стоимостью, низкими требованиями к квалификации пользователя и эффективными алгоритмами обработки фотоматериала.

Очевидно, что нестрогая фотограмметрия, как технология, является перспективным и достаточно бюджетным средством фиксации материалов раскопа. При этом полнота документации пластов раскопа, его отдельных сооружений, стен, других объектов во много раз превосходит полноту документации раскопов, полученную ручным способом, не говоря уже о качестве получаемого графического материала.

Мы полагаем, что предложенная методическая база наряду с использованием геоинформационных систем и высокоточной геодезии в ближайшем будущем должна стать составляющей локальной инфраструктуры пространственных данных для проведения полевых археологических исследований на раскопе.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Республиканского фонда возрождения памятников истории и культуры Республики Татарстан и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 02.G25.31.0170) и средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета

в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. Антонович К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии: в 2 т. – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – Т. 1. – 334 с.
2. Васильев С.А. АИС Археограф: система описания археологических памятников и вывода данных в ГИС // Археология и компьютерные технологии: представление и анализ археологических материалов: Информ. бюл. ассоц. «История и компьютер». – Ижевск, 2005. – Т. 34. – С. 9–11.
3. Васильев С.А., Городилов А.Ю., Бочкарёва М.А. Электронная фиксация полевых данных на охранных археологических раскопах // Бюл. Ин-та истории материальной культуры РАН. – 2010. – № 1. – С. 175–181.
4. Авдусин Д.А. Полевая археология СССР. – М.: Высш. шк., 1980. – 335 с.
5. Старовойтов А.В., Чернова И.Ю. Создание локальной инфраструктуры пространственных данных для ведения археологических исследований на базе современных геодезических и ГИС-технологий // V междунар. науч.-практ. конф. «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки» (Fundamental science and technology – promising developments V). – SPC Academic, 2015. – Т. 2. – С. 18–29.
6. ГОСТ РФ 51833-2001. Фотограмметрия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
7. Сингатулин Р.А. Фотограмметрические технологии в археологии (краткий исторический очерк) // Ист., филос., полит. и юрид. науки, культурология и искусствоведение. Вопр. теории и практики. – 2013. – Т. 1, № 3. – С. 148–152.
8. Малышев А.А., Моор В.В., Жеребятьев Д.И. Археологические памятники полуострова Абрау: этапы, методы и технологии 3D-реконструкции // Историческая информатика. Информационные технологии и математические методы в исторических исследованиях и образовании. – 2015. – № 1–2. – С. 16–27.
9. Opitz R. Photogrammetric modeling + GIS. Better methods for working with mesh data // ArcUser. – 2012. – Spring – P. 46–49.
10. Lai L., Sordini M., Campana S., Usai L., Condò F. 4D recording and analysis: The case study of Nuraghe Oes (Giave, Sardinia) // Digital Appl. Archaeol. Cult. Heritage. – 2015. – V. 2, No 4. – P. 233–239. – doi: 10.1016/j.daach.2015.09.001.
11. Гусев А.В., Ражев Д.И., Слепченко С.М., Зайцева О.В., Пушкарев А.А., Водясов Е.В., Вавулин М.В. Археологический комплекс Зеленый Яр: новые технологии полевых исследований // Урал. ист. вестн. – 2014. – № 2. – С. 89–96.
12. Zagretdinov R.V., Starovoytov A.V., Usmanov B.M. Using imaging and laser scanning technologies to create high-precision geospatial models of archeological objects // 7th Int. User Conf. Trimble Dimensions, Las Vegas, 3–5 Nov., 2014. – URL: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F273677895/GEO_6805_P_Mestemaker_GEO_6805_P_Zagretdinov.pdf.
13. Agisoft LLC. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan Professional Edition, версия 1.2 – СПб, 2016. – URL: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_ru.pdf, свободный.
14. Mcglone C. Manual of Photogrammetry. – Bethesda, Maryland: Am. Soc. Photogramm. Remote Sens., 2013. – 1372 p.
15. Starovoytov A.V., Saifutdinova G.M. Spatial information recording procedure involving methods of close range photogrammetry as applied to archaeological researches // 15th

- Int. Multidiscip. Sci. GeoConf. SGEM 2015, SGEM2015 Conf. Proc. – 2015. – Book 2, V. 1. – P. 801–806. – doi: 10.5593/SGEM2015/B21/S8.102.
16. Положение о порядке проведения археологических полевых работ (археологических раскопок и разведок) и составления научной отчётной документации (утв. постановлением РАН от 20.06.2018 № 32). – М.: Ин-т археологии РАН, 2018. – 64 с. – URL: https://www.archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2018_2.pdf.

Поступила в редакцию
18.02.2019

Старовойтов Александр Владимирович, ассистент кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: aldanstar@gmail.com

Чернова Инна Юрьевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геофизики и геоинформационных технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: inna.chernova@kpfu.ru

ISSN 2542-064X (Print)
ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2020, vol. 162, no. 2, pp. 314–330

doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.314-330

Close-Range Photogrammetry as a Reference Method for Making Detailed All-Level Excavation Plans

*A. V. Starovoytov**, *I. Yu. Chernova***

Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia
E-mail: *aldanstar@gmail.com, **inna.chernova@kpfu.ru

Received February 18, 2019

Abstract

One of the major problems that archaeology faces today is that the traditional (“manual”) methods of archaeological field data classification and archiving fail to meet the modern requirements in the context of accuracy and convenience. In this study, we assessed the utility of standard photogrammetry for creating excavation plans, as well as developed and tested new methods. All works were performed at the excavation sites of Bolghar, an ancient town in Tatarstan (Russia). The excavations varied in size and depth.

The standard methods were found to often yield improper results for the following reasons: the common methods used for obtaining images and processing photo scenes are unsuitable for producing three-dimensional models of archaeological objects without information loss or distortions; photo shooting appears rather haphazard in many cases.

Three new photogrammetric methods were proposed: perspective route photo shooting; the method of fixed angles; suborthogonal photo shooting around the perimeter. The effectiveness of the new methods was assessed. Recommendations on their use were given.

Based on the results of the study, we concluded that various photogrammetric methods are required to produce highly accurate plans of excavations with different dimensions and shapes. In order to obtain the best result, integration of these methods is required in many cases. Close-range photogrammetry may come

in useful if high-precision geodetic equipment is unavailable. Orthophotomaps are less precise than GNSS-based plans, but much more accurate than manual sketches.

The results obtained during this study are important for the development of field archaeology. The recommendations given in this paper can be used by archaeologists in their daily work. Compliance with these recommendations guarantees high-precision excavation plans. It is expected that the proposed methodology will become the basis for instructions on arrangement of archaeological excavations in the very near future.

Keywords: close-range photogrammetry, terrestrial photogrammetry, methodology, method, excavation site, Bolghar

Acknowledgments. The study was supported by the Regional Foundation for Rebuilding the Republic of Historical and Cultural Monuments in the Republic of Tatarstan, Ministry of Education and Science of the Russian Federation (project no. 02.G25.31.0170), as well as by the Russian Government Program of Competitive Growth of Kazan Federal University.

Figure Captions

- Fig. 1. Location of the studied territory and target excavations.
- Fig. 2. Photo-shooting scenarios from the Agisoft PhotoScan User Guide [13]: *a*) photographing a two-dimensional object (such as a wall); *b*) interior shooting; *c*) photographing detached objects (findings, sculptures) or constructions (buildings).
- Fig. 3. Changes in the image resolution with distance from the shooting point: *a*) a photo taken during the photogrammetric measurement of excavation site CCII(202) (2014) at the continent level; *b*) perspective transformation of the photo in GIS.
- Fig. 4. Examples of distortions in the image of excavation walls caused by parallel shooting (1 – walls of the virtual excavation model resulting from the incorrect choice of shooting technique; 2 – actual geometry of the excavation in the plan).
- Fig. 5. Schemes of using the methods of perspective route photo shooting (*a*) and fixed angles (*b*) (1 – excavation objects, 2 – photographed surface, 3 – position and direction of shooting inside the excavation site, 4 – direction of operator movement, 5 – alternative variant of shooting from the edge).
- Fig. 6. Examples of orthophotomap (*a*) and vector image (*b*) of human remains. Isolines and relief shading (*b*) obtained from the DTM of burial no. 3, excavation site CCII(202). Bolghar settlement, 2014. Three-dimensional arrows indicate camera position and shooting directions.
- Fig. 7. Orthophotomaps obtained by the method of fixed angles and the planography of excavation sites CCII(202) (on the left) and CCIII(203) (on the right) at the continent level. Bolghar settlement, 2014.
- Fig. 8. Orthophotomaps of excavation site CLXXIV(174) (excavation director I.I. Elkina) obtained by using various equipment types and methods: *a*) shooting with mobile devices by the central axis method; *b*) shooting with a SLR camera using the central axis method; *c*) shooting with a SLR camera using the method of perspective route photo shooting.

References

1. Antonovich K.M. *Ispol'zovanie sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem v geodezii* [Using Satellite Navigation Systems for Geodesy]. Vol. 1. Moscow, FGUP "Kartgeotsentr", 2005. 334 p. (In Russian)
2. Vasil'ev S.A. AIS Archeograf: A system for description of archaeological sites and GIS plotting. *Arkheol. Komp'yut. Tekhnol.: Predstavlenie Anal. Arkheol. Mater.: Inf. Byull. Assots. "Ist. Komp'yut."*, 2005, vol. 34, pp. 9–11. (In Russian)
3. Vasil'ev S.A., Gorodilov A.Yu., Bochkareva M.A. Electronic recoding of field data during salvage excavations. *Byull. Inst. Ist. Mater. Kul't. Ross. Akad. Nauk*, 2010, no. 1, pp. 175–181. (In Russian)
4. Avdusin D.A. *Polevaya arkheologiya SSSR* [Field Archaeology in the Soviet Union]. Moscow, Vyssh. Shk., 1980. 335 p. (In Russian)
5. Starovoytov A.V., Chernova I.Yu. Creating a local infrastructure of spatial data for archaeological research based on the advanced geodetic and GIS technologies. *V mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Fundamental'naya nauka i tekhnologii – perspektivnye razrabotki"* [Proc. V Int. Sci.-Pract. Conf.

- “Fundamental Science and Technology – Promising Developments”]. Vol. 2. SPC Acad., 2015, pp. 18–29. (In Russian)
6. State Standard 51833-2001. Photogrammetry. Terms and definitions. Moscow, Izd. Stand., 2002. 12 p. (In Russian)
 7. Singatullin R.A. Photogrammetric technologies in archaeology (a brief historical essay). *Ist., Filos., Polit., Yurid. Nauki, Kul'turolog., Iskusstvoved. Vopr. Teor. Prakt.*, 2013, vol. 1, no. 3, pp. 148–152. (In Russian)
 8. Malyshev A.A., Moor V.V., Zherybat'ev D.I. Archaeological sites of the Abrau Peninsular: Stages, methods, and technologies of 3D reconstruction. *Ist. Inf. Inf. Tekhnol. Mat. Metody Ist. Issled. Obraz.*, 2015, nos. 1–2, pp. 16–27. (In Russian)
 9. Opitz R. Photogrammetric modeling + GIS. Better methods for working with mesh data. *ArcUser*, 2012, Spring, pp. 46–49.
 10. Lai L., Sordini M., Campana S., Usai L., Condò F. 4D recording and analysis: The case study of Nuraghe Oes (Giave, Sardinia). *Digital Appl. Archaeol. Cult. Heritage*, 2015, vol. 2, no. 4, pp. 233–239. doi: 10.1016/j.daach.2015.09.001.
 11. Gusev A.V., Razhev D.I., Slepchenko S.M., Zaitseva O.V., Pushkarev A.A., Vodyasov E.V., Vavulin M.V. Zeleny Yar archaeological complex: New field research technologies. *Ural. Ist. Vestn.*, 2014, no. 2, pp. 89–96. (In Russian)
 12. Zagretdinov R.V., Starovoytov A.V., Usmanov B.M. Using imaging and laser scanning technologies to create high-precision geospatial models of archeological objects. *Proc. 7th Int. User Conf. Trimble Dimensions, Las Vegas, 3–5 Nov., 2014*. Available at: https://shelly.kpfu.ru/e-ksu/docs/F273677895/GEO_6805_P_Mestemaker_GEO_6805_P_Zagretdinov.pdf.
 13. Agisoft LLC. Agisoft PhotoScan Professional Edition User Guide, version 1.2. St. Petersburg, 2016. Available at: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_ru.pdf.
 14. McGlone C. *Manual of Photogrammetry*. Bethesda, Md., Am. Soc. Photogramm. Remote Sens., 2013. 1372 p.
 15. Starovoytov A.V., Saifutdinova G.M. Spatial information recording procedure involving methods of close range photogrammetry as applied to archaeological researches. *Proc. 15th Int. Multidiscip. Sci. GeoConf. SGEM 2015*, 2015, book 2, vol. 1, pp. 801–806. doi: 10.5593/SGEM2015/B21/S8.102.
 16. *Polozhenie o poryadke provedeniya arkhologicheskikh polevykh rabot (arkheologicheskikh raskopok i razvedok) i sostavleniya nauchnoi otchetnoi dokumentatsii (utv. postanovleniem RAN ot 20.06.2018 no. 32)* [Regulation on the Procedure for Archaeological Field Works (Excavations and Explorations) and Scientific Reporting (Approved by Regulation No. 32 of the Russian Academy of Sciences as of June 20, 2018)]. Moscow, Inst. Arkheol. Ross. Akad. Nauk, 2018. 64 p. Available at: https://www.archaeolog.ru/media/OPI/Polozhenie_2018_2.pdf.

Для цитирования: Старовойтов А.В., Чернова И.Ю. Нестрогая фотограмметрия как базовый метод для создания высокоточных планов раскопа на всех уровнях вскрытия // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. – 2020. – Т. 162, кн. 2. – С. 314–330. – doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.314-330.

For citation: Starovoytov A.V., Chernova I.Yu. Close-range photogrammetry as a reference method for making detailed all-level excavation plans. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennyye Nauki*, 2020, vol. 162, no. 2, pp. 314–330. doi: 10.26907/2542-064X.2020.2.314-330. (In Russian)