

Научная статья / Research Article

УДК 902.4:778

[https://doi.org/10.14258/tpai\(2026\)38\(1\).-02](https://doi.org/10.14258/tpai(2026)38(1).-02)

EDN: TLKOTJ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИНИАТЮРНЫХ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ НА ПРИМЕРЕ РЫБОЛОВНЫХ КРЮЧКОВ РИМСКОГО ВРЕМЕНИ

Сергей Валерьевич Ольховский^{1*}, Юрий Михайлович Свойский²,
Анна Павловна Гирич³, Екатерина Васильевна Романенко⁴

¹Институт археологии РАН, Москва, Россия;
uwiaran@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8729-1880>

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Москва, Россия; Лаборатория RSSDA, Москва, Россия;
rutil28@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6256-4299>

³Институт археологии РАН, Москва, Россия; Лаборатория RSSDA, Москва, Россия;
girichap20@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3916-0733>

⁴Лаборатория RSSDA, Москва, Россия;
eromanenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5138-9202>

*Автор, ответственный за переписку

Резюме. Цифровое документирование серии рыболовных крючков римского времени показало, что фотограмметрическим способом технически возможно создать трехмерные полигональные модели миниатюрных археологических предметов сложной геометрии, обеспечив при этом точность и детальность, достаточные для исследования их морфологии. Исходные данные для макрофотограмметрии возможно получить двумя способами: с использованием фокус-стекинга и без него, при условии обеспечения достаточной глубины резкости исходных фотографий. В результате экспериментальных съемок построены модели со средней дискретностью 0,016 мм (с фокус-стекингом) и 0,022 мм (без фокус-стекинга). Качество моделирования обеспечивается корректным подбором оборудования и выдерживанием схемы съемки. Метод достаточно прост в освоении и может быть рекомендован для моделирования предметов, изготовленных из проволоки диаметром от 1,5 мм и более, за исключением предметов с однотонной поверхностью (полировка, однородная черная патина).

Ключевые слова: рыболовные крючки, макрофотограмметрия, фокус-стекинг, глубина резкости, Фанагория, трехмерное моделирование

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 24-28-20432: «Разработка технологии массового документирования миниатюрных археологических предметов на примере рыболовного инвентаря римского времени»).

Для цитирования: Ольховский С.В., Свойский Ю.М., Гирич А.П., Романенко Е.В. Моделирование миниатюрных археологических предметов сложной геометрии на примере рыболовных крючков римского времени // Теория и практика археологических исследований. 2026. Т. 38, № 1. С. 25–38. [https://doi.org/10.14258/tpai\(2026\)38\(1\).-02](https://doi.org/10.14258/tpai(2026)38(1).-02)

MODELING MINIATURE ARCHAEOLOGICAL OBJECTS OF COMPLEX GEOMETRY BASED ON ROMAN FISHING HOOKS

Sergey V. Olkhovskiy^{1*}, Yuri M. Svoyski²,
Anna P. Girich³, Ekaterina V. Romanenko⁴

¹Institute of Archaeology Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
uwiaran@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8729-1880>;

²National Research University Higher School of Economics,
Moscow, Russia; RSSDA Laboratory, Moscow, Russia;
rutil28@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6256-4299>;

³Institute of Archaeology Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia; RSSDA Laboratory, Moscow, Russia;
girichap20@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3916-0733>

⁴RSSDA Laboratory, Moscow, Russia;
eromanenko@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5138-9202>

*Corresponding Author

Abstract. Documenting of a series of Roman time fishing hooks has demonstrated that photogrammetric methods can technically produce 3D polygonal models of miniature archaeological finds with complex geometry, achieving sufficient accuracy and detail for morphological analysis. Raw data for macro-photogrammetry can be acquired in two ways: using focus stacking and without focus stacking — provided that the source photographs have sufficient depth of field. Experimental shoots yielded models with the following average discretization: 0,016 mm (with focus stacking); 0,022 mm (without focus stacking). Modeling quality is ensured by proper selection of equipment and adherence to the shooting scheme. The method is sufficiently straightforward to learn and can be recommended for modeling objects made of wire with a diameter of 1,5 mm or more — except for items with a plain surface (e.g., polished surfaces or uniformly black patina).

Keywords: fishing hooks, macrophotogrammetry, focus stacking, depth of field, Phanagoria, the Roman period, 3D modeling

Acknowledgments: the work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 24–28–20432: “Development of Technology for Mass Documentation of Miniature Archaeological Objects Based on Fishing Equipment from the Roman period”).

For citation: Olkhovskiy S.V., Svoyski Yu.M., Girich A.P., Romanenko E.V. Modeling Miniature Archaeological Objects of Complex Geometry Based on Roman Fishing Hooks // *Teoriya i praktika arheologicheskikh issledovaniy = Theory and Practice of Archaeological Research*. 2026;38(1):25–38. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/tpai\(2026\)38\(1\).-02](https://doi.org/10.14258/tpai(2026)38(1).-02)

Введение
Рыболовные крючки античного и римского времени являются редкими археологическими находками. Это объясняется как их функциональной спецификой (использование и преимущественная утрата в акваториях), так и особенностями конструкции, затрудняющими сохранение и обнаружение (миниатюрность, металл). Многие найденные на суше рыболовные крючки, как правило, повреждены коррозией, осложняющей их документирование и типологическое описание. Но даже в случае удаления продуктов коррозии опубликовать такие предметы сложно из-за технических проблем, связанных с достоверной визуализацией их формы и типологических при-

знаков. Целью настоящей статьи является формулировка способа введения в научный оборот этой редкой категории археологических предметов. Объектом нашего исследования является серия бронзовых рыболовных крючков, найденных в слое донных отложений по периметру причала Фанагории, построенного в конце III в. н.э. и функционировавшего по крайней мере до VI в. н.э.

Анализ и научную публикацию рыболовных крючков крайне затрудняют их миниатюрные размеры и состояние сохранности. Стандартные методы макрофотографии не позволяют зафиксировать детали, важные для типологизации крючков и реконструкции технологии их изготовления, — например, форму сечения и изменение этой формы в пределах предмета. Аналоговая прорисовка не только трудоемка, но и недостаточно точна. Вследствие плохой сохранности (в частности, хрупкости) рыболовных крючков любое прикосновение к ним, в том числе штангенциркулем, может их повредить, что дополнительно затрудняет измерения. Представляется, что наиболее подходящим исходным материалом для анализа и публикации является трехмерная полигональная модель, позволяющая выполнить точные измерения хрупкого предмета, а также подготовить набор иллюстраций (в том числе сечений). При этом модель рассматривается как размерный цифровой образ, воспроизводящий геометрию предмета и обеспечивающий возможность его изучения (в частности, выполнения измерений и построения сечений) без риска физического повреждения. Помимо того, этот цифровой образ является основой для публикации, выполняемой как полиграфическим, так и цифровым способом. Для этого на основе модели создаются двухмерные растровые рендеры, которые при необходимости дополняются сечениями и реконструкциями и оформляются по правилам оформления археологического рисунка.

В случае рыболовных крючков модели должны быть достаточно детальными, так как диаметр проволоки, из которой они изготовлены, составляет от 1,1 до 3,8 мм. Поэтому мы полагаем, что для рыболовного крючка (или иного предмета сходной геометрии) дискретность (средний размер полигона) модели должна быть не ниже 0,05 мм. На современном этапе развития измерительных технологий подобную модель можно создать только фотограмметрическим способом, так как иные либо не обеспечивают достаточную дискретность, либо за пределами дороги в применении. Однако и фотограмметрия в случае миниатюрных предметов имеет свои ограничения, связанные со спецификой макросъемки, оптическими параметрами оборудования и свойствами поверхности документируемых предметов. В связи с этим целью нашего исследования стала разработка методики съемки миниатюрных и тонких предметов сложной формы, включая технологические приемы и определение комплекса оборудования, подходящего для создания полигональных моделей необходимой детальности.

При фотограмметрическом моделировании рыболовного крючка основная сложность связана с соотношением диаметра проволоки и линейных размеров предмета в целом. При фотосъемке предмета с любого ракурса пиксели, соответствующие изображению собственно крючка, составляют крайне незначительную долю (не более 1,5%) от общего числа пикселей в кадре. В результате количество пикселей, пригодных для использования при увязке фотоснимков, может оказаться недостаточным.

В общем случае для получения качественной модели необходимо обеспечить высокую детальность изображения (т.е. большое число пикселей, пригодных для распознавания), что достигается увеличением масштаба фотоснимка. Однако это требует приближения камеры к объекту, следствием чего становится уменьшение глубины резко изображаемого пространства (ГРИП). Уменьшение же ГРИП приводит к тому, что часть пикселей изображения объекта оказывается вне зоны резкости и не может быть использована для фототриангуляции (увязки фотоснимков) (рис. 1).

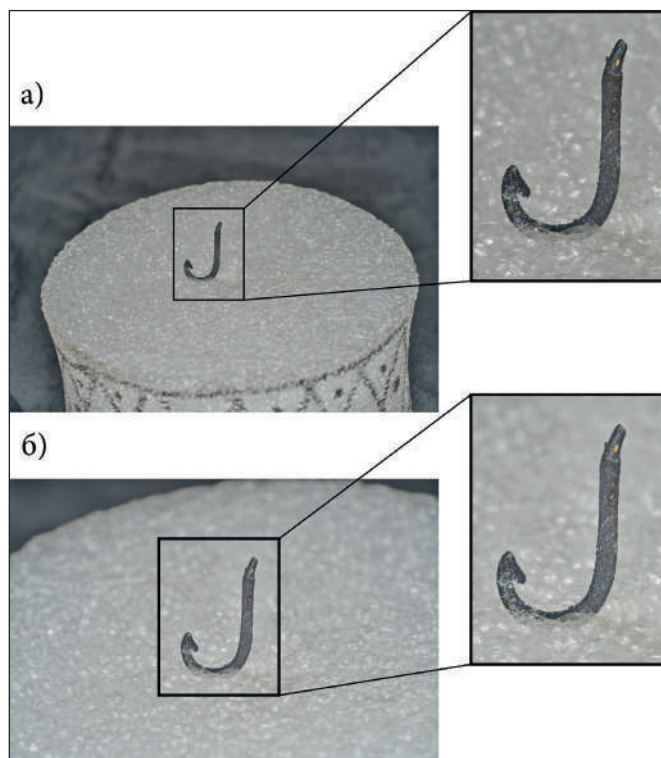


Рис. 1. Взаимосвязь масштаба изображения и глубины резко изображаемого пространства: слева — полный кадр, справа — участок детализации. Фотографии сделаны камерой Sony A7RV с объективом Sony FE 90mm f/2.8 Macro G OSS. Крючок на фотоснимке располагается под углом 30° к оптической оси фотосистемы. В обоих случаях фотоснимки не оптимальны для получения качественной модели: а) выдержка 1/200, f/9, ISO 200, дистанция съемки 50 см, ГРИП 15 мм, масштаб 1:4.55 — весь предмет в зоне резкости; б) выдержка 1/200, f/9, ISO 200, дистанция съемки 30 см, ГРИП 4,3 мм, масштаб 1:2.33 — часть предмета в зоне резкости

Fig. 1. The relationship between image scale and depth of field: left — full frame; right — detail close-up. Photos taken with a Sony A7RV camera and a Sony FE 90mm f/2.8 Macro G OSS lens. The fishing hook in the photo is positioned at a 30-degree angle to the optical axis of the imaging system. In both cases, the photos are not optimal for generating a high-quality 3D model: a) Shutter speed: 1/200 s; aperture: f/9; ISO: 200; shooting distance: 50 cm; DOF: 15 mm; scale: 1:4.55 — the entire object is in focus; b) Shutter speed: 1/200 s; aperture: f/9; ISO: 200; shooting distance: 30 cm; DOF: 4.3 mm; scale: 1:2.33 — only part of the object is in focus

Увеличить ГРИП возможно путем уменьшения относительного отверстия объектива (диафрагмированием), но эта возможность ограничена дифракционным пределом оптической системы — фундаментальным физическим явлением, связанным с волновой природой света. При уменьшении диаметра входного зрачка с целью увеличения глубины резкости свет вследствие своей волновой природы начинает огибать края лепестков диафрагмы. В результате на матрице формируется не геометрическая точка, а «размытое пятно» (диск Эйри). Чем сильнее закрыта диафрагма, тем больше становятся эти «пятна». В итоге общая резкость изображения не увеличивается, а, наоборот, падает — детали «замываются». Чем меньше размер пикселя матрицы, тем быстрее дифракция начинает заметно ограничивать разрешение, достижимое при данной плотности пикселей. В конечном итоге при диафрагмировании за дифракционный предел изображение остается резким, но перестает быть четким.

Таким образом, для изготовления качественной модели необходимы фотоснимки, одновременно удовлетворяющие двум противоречащим друг другу требованиям — «крупного масштаба» и «равномерной резкости изображения», а также связанному с ними требованию сохранения «четкости изображения».

Одним из способов радикального разрешения этого противоречия является фокус-стекинг (синонимы: брекетинг по фокусу, «слияние фокусной плоскости», «z-стекинг») — метод вычислительной фотографии, при котором одна и та же сцена фотографируется несколько раз с последовательным смещением фокальной плоскости. Метод разработан во второй половине 1990-х гг. и с тех пор широко применяется в макрофотографии и микроскопии (Pieper, Korpel, 1983; Forster et al., 2004). Фокус-стекинг позволяет получить серию изображений, где каждый кадр обеспечивает резкое отображение разных частей объекта, а их сумма (результатирующее изображение) собирается исключительно из резких частей, извлеченных из исходных кадров методами выделения границ и анализа Фурье. При этом смещение фокальной плоскости может быть реализовано двумя способами: перемещением камеры при зафиксированной точке фокусировки и перемещением точки фокусировки при зафиксированной камере. Начиная с 2000-х гг. фотоснимки, полученные методом фокус-стекинга, используются для фотограмметрического моделирования, в том числе при изучении археологических находок (Muzzuparra, 2014; Казаков и др., 2016; Marziali, 2017).

Несмотря на доказанную эффективность, метод фокус-стекинга отличается трудоемкостью, существенными временными затратами и требовательностью к вычислительным ресурсам, что ограничивает его применение для документирования многочисленных серий однотипных объектов. Поэтому распространенной альтернативой является подбор оборудования и сбалансированных параметров фотосъемки, обеспечивающих достаточную глубину резкости при сохранении приемлемого масштаба фотоснимков. Как правило, при этом неизбежно некоторое снижение детальности моделирования.

Исходя из вышеизложенных соображений, а также опыта фотограмметрического моделирования крупных серий малоразмерных предметов, в том числе 321 рыболовного грузила римского времени (Ольховский и др., 2025) и 444 палеолитических бусин (Свойский и др., 2026), мы предприняли моделирование серии из 37 рыболов-

ных крючков.¹ Целью эксперимента, помимо отработки технологии создания моделей и иллюстративных материалов для миниатюрных предметов сложной геометрии, стало определение оптимальных конфигураций оборудования и параметров фотосъемки, а также определение границ применимости метода. Кроме того, уже в ходе эксперимента появилась дополнительная задача: сопоставление результативности двух методов фотосъемки (со стекингом и без стекинга) с определением реальной дискретности полученных моделей. В обоих случаях предметы (в данном случае — рыболовные крючки) фотографировались ротационным способом с вертикальным закреплением на автоматическом поворотном столе, помещенном в световой куб и синхронизированном с фотоаппаратом. Для обеспечения освещенности, достаточной для неограниченного диафрагмирования объектива (в пределах дифракционного предела фотосистемы), использовался накамерный кольцевой осветитель Godox AR-400. Применение кольцевого осветителя обеспечивало достаточное количество света для фотосъемки с максимально закрытой диафрагмой на достаточно короткой выдержке в 1/200 при ISO 200. Для цветокоррекции применялась калибровочная мишень Datacolor SpyderCube, размеры задавались по масштабному базису собственной разработки. Отснятые кадры записывались в формате ARW. Во всех случаях применялся ручной способ фокусировки.

Материалы и методы исследований

Фотосъемка со стекингом

Фотосъемка со стекингом выполнена для серии из 11 крючков беззеркальной цифровой камерой Sony A7RV (матрица 61 Мп, физические размеры сенсора 35,9×24 мм, размер пикселя 3,8 мкм, дифракционный предел 10,2) с макрообъективом Sony FE 90mm f/2.8 Macro G OSS (SEL90M28G) с фиксированным фокусным расстоянием 90 мм. Эта фотокамера обладает встроенным режимом съемки «автоматический брекетинг по фокусу» и аппаратно реализует технологию фокус-стекинга последовательным смещением фокальной плоскости за счет перемещения точки фокусировки при неподвижной камере, что обеспечивает сохранение постоянной геометрии сцены. При этом фотокамере необходимо обеспечить полную неподвижность, так как даже незначительные угловые смещения оси оптической системы вызывают ошибки при выполнении стекинга. Эту проблему удалось решить, установив фотокамеру на штатив тахеометра — гораздо более устойчивый, чем обычный фотоштатив.

Фотографирование выполнялось при двух вертикальных положениях предмета: первый раз крючок устанавливали на поддѐв (шейку), второй раз — на цевье (лопатку). В обоих положениях выполнялись по три серии съемки при углах наклона оптической оси камеры 0°, 40° и 70° относительно горизонтальной поверхности. Количество позиций съемки в серии составляло 32, 16 и 8 для каждого из указанных углов соответственно. Дистанция съемки определялась размерами крючка

¹ В документировании, моделировании, анализе результатов и подготовке исходных материалов для настоящей статьи принимали участие А. П. Гирич, Ю. А. Миронова, А. А. Чернухина, А. Н. Уральская, Д. К. Быкова, Ю. М. Свойский, Е. В. Романенко.

и подбирались для обеспечения резкости изображения по всему полю кадра. Для крючка среднего размера (длина 26 мм) рабочее расстояние составляло 40 см. В каждой позиции для последующего фокус-стекинга выполнялось семь кадров с шагом по глубине резкости. Такая схема съемки теоретически дает 784 исходных фотоснимка, которые фокус-стекингом преобразуются в 112. На практике из-за кадров, необходимых для масштабирования модели, а также из-за потребности в отдельных случаях в дополнительных сериях кадров количество фотоснимков колебалось в пределах от 123 до 138. При съемке более крупных крючков, выполненной объективом с фокусным расстоянием 50 мм, для сохранения детальности моделирования также потребовалось сделать дополнительные кадры. При этом число снимков для угла наклона 40° всегда увеличивалось до 32, а для угла наклона 70° либо увеличивалось до 16, либо оставалось прежним. В обработку при этом поступало от 176 до 193 фотоснимков.

Подготовка данных к фотограмметрической обработке состояла из двух операций: (1) обычной процедуры цветокоррекции и конвертации фотоснимков в формат JPG в ПО Capture One и (2) фокус-стекинга в ПО Helicon Focus 8. Так как фотосъемка велась в автоматизированном режиме, фотоснимки для фокус-стекинга сначала разбирались по сериям, соответствующим точкам фотографирования. Для автоматизации обработки исходные фотоснимки группировались по точкам фотографирования (по семь кадров) и перемещались в отдельные папки. Эта операция осуществлялась запуском скрипта в командной строке ОС Windows. Объединение фотографий из каждой папки в одно EDF-изображение выполнялось пакетной обработкой в ПО Helicon Focus 8, с автоматическим присвоением этому EDF-изображению уникального номера, состоящего из шифра модели и порядкового номера фотографии в серии.

Фотограмметрическая обработка выполнялась в ПО Reality Capture и состояла из стандартных операций: фототриангуляции, создания облака точек, задания размеров по масштабному базису, выравнивания, построения полигональной модели и текстурирования.

В качестве эксперимента, помимо фотограмметрического моделирования на основе EDF-изображений, для одного предмета дополнительно было выполнено моделирование на основе исходных фотоснимков, полученных брекетингом по фокусу, но не обработанных фокус-стекингом. Результаты этого эксперимента показали, что алгоритмы ПО Reality Capture способны обрабатывать такие массивы фотоснимков, однако время выполнения операций фототриангуляции и моделирования существенно возрастает (так как приходится обрабатывать в 5–7 раз больше фотоснимков), а качество модели и текстуры заметно снижается, что выражается в некотором сглаживании модели и снижении четкости изображения на текстуре (рис. 2). Модель, созданная на основе EDF-изображений, состоит из большего количества полигонов (2,81 млн) и имеет меньший размер ребра полигона (0,0187 мм), в то время как модель на основе исходных фотографий состоит из меньшего количества полигонов (2,38 млн) и имеет больший размер ребра (0,0202 мм).

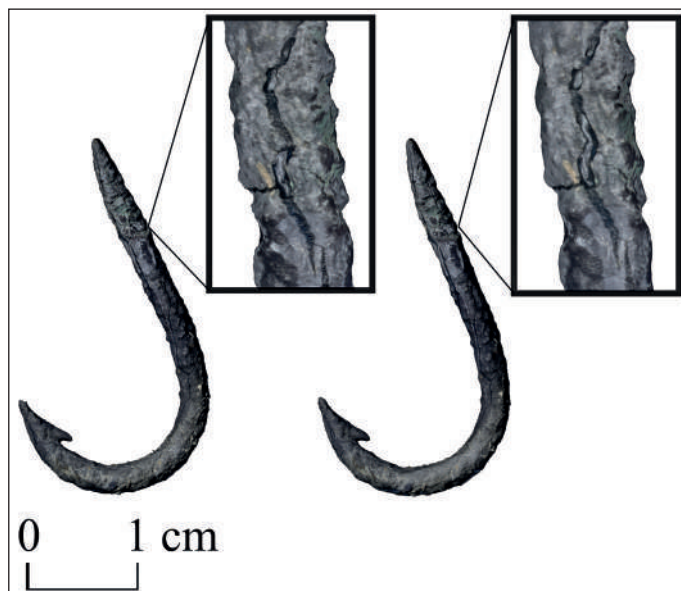


Рис. 2. Трехмерные полигональные модели крючка № 07F-0674. Слева — модель из EDF-изображений, выглядит более детально. Справа — модель из исходных фотографий, отличается сглаженной геометрией и менее контрастной цветовой текстурой

Fig. 2. 3D polygonal models of fishing hook no. 07F-0674. Left — model derived from EDF images, appears more detailed. Right — model generated from original photographs, characterized by smoother geometry and less contrasting color texture

Тем не менее фотограмметрическая обработка исходных фотоснимков съемки с брекетингом по фокусу, но без предварительного стекинга допустима в тех случаях, когда по тем или иным причинам обеспечить неподвижное положение камеры во время съемки технически невозможно, что приводит к ошибкам фокус-стекинга.

В результате созданы 11 моделей рыболовных крючков с количеством полигонов от 1,2 до 15,8 млн и дискретностью (средним размером ребра полигона) от 0,0116 до 0,0212 мм (в среднем 0,0161 мм). Этот результат можно охарактеризовать как хороший, но полученный достаточно трудоемким способом. Поэтому мы опробовали второй способ — моделирование по фотографиям, полученным без применения брекетинга по фокусу. Целью этого эксперимента был подбор оборудования и режима фотосъемки, обеспечивающий сопоставимые результаты при меньших трудозатратах.

Фотосъемка без стекинга

Логика подбора оборудования и режима фотосъемки в этом случае основывалась на концепции увеличения зоны резкости фотоснимка за счет диафрагмирования объектива. Ограничением при этом является, как указывалось выше, значение дифракционного предела фотосистемы, на практике зависящее от размера единичного пикселя матрицы цифровой камеры. При одинаковом физическом размере матрицы чем больше размер единичного пикселя, тем сильнее можно диафрагмировать объектив. Так, например, для фотокамер Sony серии A7 (табл. 1):

Таблица 1

**Сравнение размерных параметров полнокадровых
матриц беззеркальных камер Sony**

Tab. 1

**Comparison of dimensional parameters of full-frame sensors
in Sony mirrorless cameras**

	Sony A7SIII	Sony A7III	Sony A7RIII
Матрица, Мп	12,1	24,0	42,4
Размер матрицы, мм	35,6×23,8	35,6×23,8	35,9×24,0
Размер пикселя, мкм	8,5	6	4,5
Практический предел дифракции	23	16,3	12,3

Однако увеличение физического размера пикселя означает, что при съемке с одинакового расстояния теряется разрешение цифрового фотоизображения и, как следствие, дискретность фотограмметрической модели. Это возможно компенсировать приближением камеры к документируемому объекту, но это приближение ограничено минимальной дистанцией фокусировки объектива. Таким образом, в конечном итоге при подборе фотосистемы задача сводится к поиску баланса между техническими характеристиками камеры и ее положением относительно моделируемого предмета.

С учетом вышесказанного для фотосъемки без стекинга была избрана камера Sony A7III (матрица 24 Мп, физические размеры 35,6×23,8 мм, размер пикселя 6 мкм, дифракционный предел 16,3) с объективами Sony FE 90mm f/2.8 Macro G OSS (SEL90M28G) и FE 50mm f/2.8 Macro (SEL50M28). Выбор объектива зависел от размеров предмета: для съемки относительно крупных крючков применялся макрообъектив 50 мм. Остальные элементы оборудования использовались те же, что и при фотосъемке со стекингом.

Фотосъемка выполнялась по схеме, аналогичной описанной выше. Крючок, как и при съемке с фокус-стекингом, выставлялся в два вертикальных положения: на поддѣв и на цевьѣ. Количество серий кадров осталось прежним, но углы наклона камеры были скорректированы: 0°, 22° (вместо 40°) и 45° (вместо 70°) для достижения компромисса между необходимостью получения достаточного количества характерных точек и обеспечением приемлемой глубины резкости. При угле наклона камеры в 70° без стекинга по фокусу сложнее получить равномерно резкое изображение всего крючка, а число увязочных точек оказывается недостаточным. Количество кадров в сериях при этом было увеличено в два раза — до 48, 32 и 16 соответственно. Дистанция съемки определялась размерами крючка и корректировалась в зависимости от угла наклона для обеспечения необходимой глубины резкости: чем больше угол наклона камеры, тем большая глубина резкости необходима. Так, например, для крючка высотой 26 мм были применены следующие параметры положения камеры: при угле 45° дистанция составила 50 см, при 22° — 45 см, а при 0° — 40 см. Общее число фотоснимков, сделанных для моделирования одного крючка, составляло от 208 до 231.

Процедура дальнейшей фотограмметрической обработки аналогична описанной для фотосъемки со стекингом.

В результате изготовлены девять моделей рыболовных крючков с числом полигонов от 0,61 млн до 2,98 млн и дискретностью (средним размером ребра полигона) от 0,0145 до 0,0287 мм. Качество фотографической текстуры при этом также несколько снизилось, однако это снижение визуально практически не различимо (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение результатов моделирования с фокус-стекингом и без фокус-стекинга для серии рыболовных крючков

Tab. 2

Comparison of modeling results with and without focus stacking for a series of fishing hooks

Способ съемки	С фокус-стекингом	Без фокус-стекинга
Количество предметов	11	9
Камера	Sony A7RV	Sony A7III
Матрица, Мп	61	24
Размер матрицы, мм	35,9×24	35,6×23,8
Размер пикселя, мкм	3,8	6
Практический предел дифракции	10,2	16,3
Фактически примененная диафрагма	9	16
Среднее число исходных фотоснимков	879	212
Среднее число фотоснимков, использованных для фотограмметрической обработки	143	212
Средний размер полигона модели, мм	0,0161	0,0223

Заключение

Экспериментальное документирование серии рыболовных крючков показало, что трехмерное моделирование фотограмметрическим способом позволяет, с определенными ограничениями, получать цифровые копии малоразмерных предметов сложной геометрии. Самым сложным для моделирования материалом при этом оказались предметы, изготовленные из проволоки сечением менее 1,5 мм, а также предметы любого размера, покрытые однородной черной патиной. В этих случаях фотограмметрический алгоритм не может идентифицировать достаточное число точек, пригодных для формирования полигональной модели, и фотограмметрическое моделирование оказывается технически невозможным. В изученной выборке таких предметов оказалось несколько менее половины — 17 из 37 штук². Для крючков, изготовленных из проволоки толщиной более 1,5 мм и не покрытых однородной черной патиной, при использовании фокус-стекинга вполне достижима дискретность порядка 0,0162 мм (в отдельных случаях до 0,0116 мм). Съемка без фокус-стекинга дает несколько худшие результаты — удается получать модели с дискретностью порядка 0,0223 мм, в наилучшем случае была создана модель с размером полигона 0,0145 мм. Таким образом, разница в средней дискретности находится на уровне

² С результатами проекта можно ознакомиться по ссылке: <https://rssda.su/workdata/rsf-24-28-20432/>

статистической погрешности, но при этом при съемке без фокус-стекинга наблюдается несколько больший разброс максимального и минимального значения дискретности (0,0145–0,0287 мм против 0,0116–0,0212 мм при съемке с фокус-стекингом) (рис. 3).

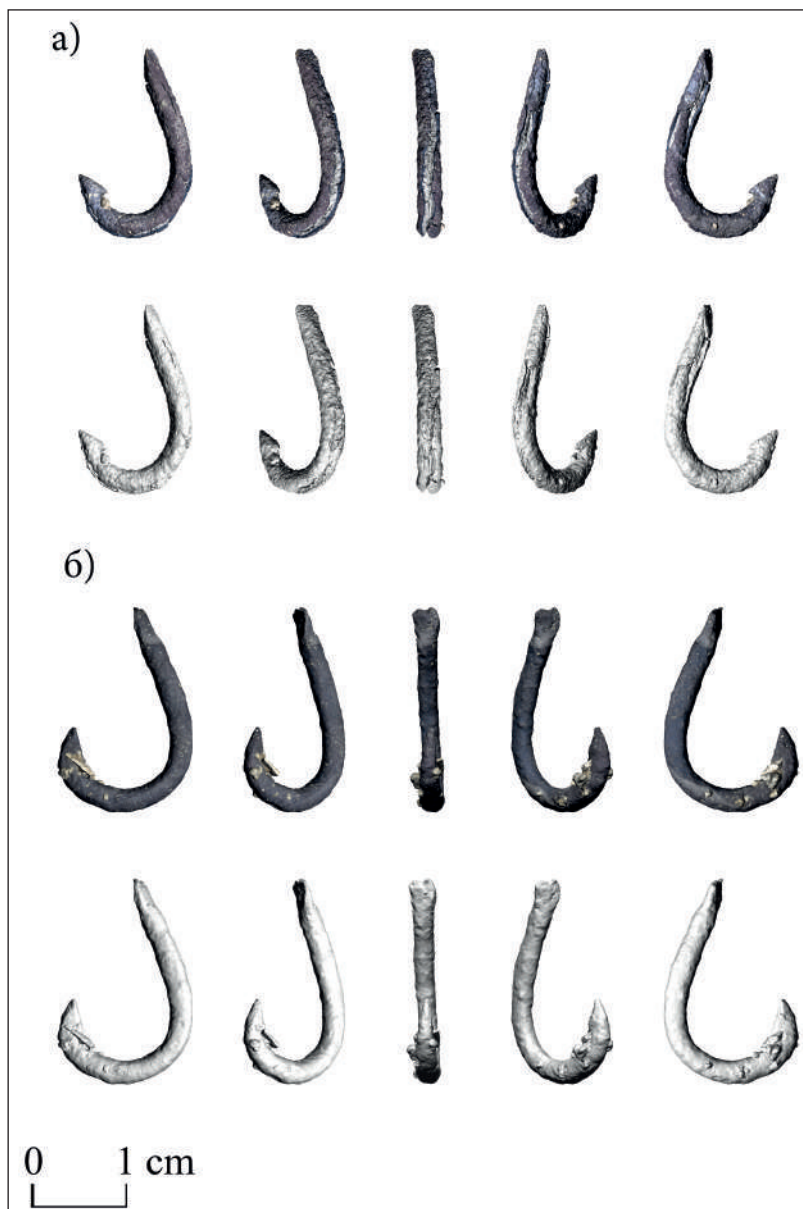


Рис. 3. Примеры визуализации: а) трехмерная полигональная модель крючка № 07F-0764, созданная методом брекетинга по фокусу, с текстурой и без текстуры; б) трехмерная полигональная модель крючка № 07F-0702, созданная без применения метода брекетинга по фокусу, с текстурой и без текстуры

Fig. 3. Visualization of 3D polygonal models of fishing hooks: a) 3D polygonal model of fishing hook no. 07F-0764, created using focus bracketing, shown with and without texture; b) 3D polygonal model of fishing hook no. 07F-0702, created without focus bracketing, shown with and without texture

Как в случае моделирования на основе результатов фокус-стекинга, так и без него дискретность получаемых моделей оказывается вполне достаточной для изучения морфологии миниатюрных предметов, точных измерений и построения сечений. Представляется, что для моделирования таких предметов применение фокус-стекинга следует признать избыточным, так как достаточное для целей и задач исследования качество моделирования может быть получено менее трудозатратным способом. Исключением здесь могут стать только уникальные предметы, а также предметы, моделируемые для исследования технологических особенностей их изготовления. В остальных случаях качество моделирования может быть обеспечено корректным подбором оборудования (критическое значение имеет физический размер матрицы, размер пикселя матрицы и наличие хорошей подсветки, позволяющей диафрагмировать объектив без увеличения экспозиции) и выдерживанием схемы съемки (с особым вниманием к расстояниям и углам наклона камеры).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Кзаков В.В., Ковалев В.С., Жумадилов К.Б., Шнайдер С.В. Трехмерная визуализация геометрических микролитов при помощи макрофотограмметрии // *Universum Humanitarium*. 2016. № 2. С. 65–72.

Ольховский С.В., Свойский Ю.М., Романенко Е.В., Гирич А.П., Бирюкова Е.Р. Масовое моделирование малоразмерных археологических предметов на примере рыболовного инвентаря Римского времени // *Российская археология*. 2025. № 2. С. 67–81.

Свойский Ю.М., Романенко Е.В., Хлопачев Г.А., Гирич А.П. Методология создания 3D-моделей бивневых бусин с Сунгирской стоянки: возможности извлечения и использования морфометрических данных // *Stratum plus*. 2026. № 1 (в печати).

Forster B., Van De Ville D., Berent J., Sage D., Unser M. Complex Wavelets for Extended Depth-of-Field: A New Method for the Fusion of Multichannel Microscopy Images // *Microscopy Research and Technique*. 2004. Vol. 65, № 1–2. Pp. 33–42.

Marziali S. Photogrammetry and Macro Photography. The Experience of the MUSINT II Project in the 3D Digitization of Small Archaeological Artifacts // *Studies in Digital Heritage*. 2017. Vol. 1(2). Pp. 232–246. DOI: 10.14434/sdh.v1i2.23250.

Muzzupappa M. 3D Reconstruction of Small Sized Objects from a Sequence of Multi-Focused Images // *Journal of Cultural Heritage*. 2014. Vol. 15. Pp. 173–182.

Pieper R.J., Korpel A. Image Processing for Extended Depth of Field // *Applied Optics*. 1983. Vol. 22, № 10). Pp. 1449–1453.

REFERENCES

Kazakov V.V., Kovalev V.S., Zhumadilov K.B., Shneider S.V. Three-Dimensional Visualization of Geometric Microliths Using Macrophotogrammetry. *Universum Humanitarium*. 2016;2:65–72. (In Russ.)

Olkhovskiy S.V., Svoyski Yu.M., Romanenko E.V., Girich A.P., Biryukova E.R. Mass Modeling of Small-Sized Archaeological Objects: A Case Study of Roman-Era Fishing Gear. *Rossijskaya arheologiya = Russian Archaeology*. 2025;2:67–81. (In Russ.)

Svoyski Yu.M., Romanenko E.V., Khlopachev G.A., Girich A.P. Methodology for Creating 3D Models of Mammoth Tusk Beads from the Sungir Site: Possibilities for Extracting and Using Morphometric Data. *Stratum plus*. 2026;1. (In Press).

Forster B., Van De Ville D., Berent J., Sage D., Unser M. Complex Wavelets for Extended Depth-of-Field: A New Method for the Fusion of Multichannel Microscopy Images. *Microscopy Research and Technique*. 2004;65(1–2):33–42.

Marziali S. Photogrammetry and Macro Photography. The Experience of the MUSINT II Project in the 3D Digitization of Small Archaeological Artifacts. *Studies in Digital Heritage*. 2017;1(2):232–246. DOI: 10.14434/sdh.v1i2.23250.

Muzzupappa M. 3D Reconstruction of Small Sized Objects from a Sequence of Multi-Focused Images. *Journal of Cultural Heritage*. 2014;15:173–182.

Pieper R.J., Korpel A. Image Processing for Extended Depth of Field. *Applied Optics*. 1983;22(10):1449–1453.

ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Ольховский С.В.: формирование исследовательской выборки, анализ состояния изученности археологического материала, формулировка целей и задач исследования, научное редактирование текста.

S.V. Olkhovskiy: formation of the research sample; analysis of the state of knowledge on the archaeological material; formulation of the study's goals and objectives; scientific editing of the text.

Свойский Ю.М.: разработка технологии съемки и подбор оборудования; написание статьи.

Yu.M. Svoyski: development of the photography technology and selection of equipment; writing the article.

Гирич А.П.: создание трехмерных моделей ротационным способом, фотосъемка и фотограмметрическая обработка, написание статьи.

A.P. Girich: creation of 3D models using the rotational method; photography and photogrammetric processing; writing the article.

Романенко Е.В.: анализ качества документирования, научное редактирование текста.

E.V. Romanenko: analysis of documentation quality; scientific editing of the text.

Конфликт интересов отсутствует / There is no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ольховский Сергей Валерьевич, заведующий Центром подводного археологического наследия ИА РАН, Москва, Россия.

Sergey V. Olkhovskiy, Head of the Centre for Underwater Archaeological Heritage, Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia.

Свойский Юрий Михайлович, инженер Центра античной и восточной археологии Института классического Востока и античности; руководитель Лаборатории RSSDA, Москва, Россия.

Yury M. Svoyski, Engineer, Center for Ancient and Eastern Archaeology Institute for Classical and Oriental Studies, Institute for Oriental and Classical Studies; Head, RSSDA Laboratory, Moscow, Russia;

Гирич Анна Павловна, специалист Центра подводного археологического наследия ИА РАН, Москва, Россия; Лаборатория RSSDA, Москва, Россия.

Anna P. Girich, Specialist Center for Underwater Archaeological Heritage, Institute of Archaeology, Russian Academy of Sciences (IA RAS), Moscow, Russia; RSSDA Laboratory;

Романенко Екатерина Васильевна, руководитель Лаборатории RSSDA, Москва, Россия.

Ekaterina V. Romanenko, Head of RSSDA Laboratory, Moscow, Russia.

*Статья поступила в редакцию 12.10.2025;
одобрена после рецензирования 28.11.2025;
принята к публикации 08.12.2025.
The article was submitted 12.10.2025;
approved after reviewing 28.11.2025;
accepted for publication 08.12.2025.*