

ПРОБЛЕМЫ СОХРАНЕНИЯ, ИЗУЧЕНИЯ И МУЗЕЕФИКАЦИИ ОБЪЕКТОВ АРХЕОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДИЯ, УЧЕНЫЕ-ИССЛЕДОВАТЕЛИ УРАЛО-ПОВОЛЖСКОГО РЕГИОНА И ИХ НАУЧНОЕ НАСЛЕДИЕ

УДК 930.26

<https://doi.org/10.24852/2587-6112.2024.6.260.270>

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА МУЛЬТИМАСШТАБНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНВАРИАНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АМФОРНЫХ КЛЕЙМ¹

©2024 г. Ю.М. Свойский, С.В. Ольховский, Е.В. Романенко,
А.В. Зайцев, А.П. Гирич

При изучении эпиграфических памятников, в том числе амфорных клейм, нередко возникает задача прочтения и информативной публикации надписей плохой сохранности. Настоящая статья посвящена применению алгоритма мультимасштабного интегрального инварианта (Multiscale Integral Invariant, MSII) для изучения амфорных клейм. Алгоритм рассматривается в сопоставлении с другими способами математической визуализации геометрии трехмерной полигональной поверхности, примененных при работе с массивом из 359 амфорных клейм, найденных в ходе подводных археологических раскопок в Керченском проливе. В статье рассмотрены практические вопросы определения оптимальных параметров расчета для преобразования модели алгоритмом мультимасштабного интегрального инварианта, а также выбора способов визуализации, различным образом адаптированных непосредственно для исследования амфорного клейма и для его публикации электронным и полиграфическим способом. Применение алгоритма MSII позволяет получить растровые рендеры, пригодные для обеспечения внешней верификации авторского прочтения легенды амфорного клейма.

Ключевые слова: амфорное клеймо, мультимасштабный интегральный инвариант (MSII), карта кривизны, цифровое документирование.

USE OF THE ALGORITHM OF MULTI-SCALE INTEGRAL INVARIANT IN THE STUDY OF AMPHORA STAMPS²

Yu.M. Svoiskiy, S.V. Olkhovsky, E.V. Romanenko, A.V. Zaitsev, A.P. Girich

When studying epigraphic monuments, including amphoric stamps, the task of reading and informative publication of inscriptions of poor preservation often arises. This article is dedicated to using the Multi-Scale Integral Invariant algorithm (MSII) for the study of amphora stamps. The algorithm is considered in comparison with other methods of mathematical visualization of the geometry of 3D polygonal surface used at work with an array of 359 amphora stamps found during underwater archaeological excavations in the Kerch Strait. The article deals with practical issues of determining the optimal calculation parameters for model transformation by the algorithm of MSII, as well as the choice of visualization methods adapted in various ways directly for the study of the amphora stamps and for its electronically and polygraphically publication. The use of the MSII algorithm makes it possible to get raster image suitable for providing external verification of the author's reading of the legend of the amphora stamps.

Keywords: amphora stamps, Multi-Scale Integral Invariant (MSII), curvature map, digital documentation.

Постановка проблемы

Сохранность существенной части фрагментов клейменной керамики, найденных при изучении археологических памятников

Северного Причерноморья и сопредельных регионов, оставляет желать лучшего из-за продолжительного воздействия процессов физического, химического и биологического

¹ Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 22-28-02058.

² This article was prepared by the support of the RSF grant No. 22-28-02058.

выветривания. Результаты этих воздействий проявляются в сколах (прежде всего на выступающих частях легенды клейма), в дезинтеграции относительно нестойких минералов формовочной массы, в формировании корки из гипергенных минералов, которые не всегда возможно удалить без повреждения фрагмента керамики. Цвет поверхности часто необратимо изменяется под воздействием химически активных компонентов грунтовых вод и продуктов жизнедеятельности живых организмов. Одновременно для значительного числа клейм характерны дефекты производства - малая глубина оттиска, стертость штампа, смазанность оттиска при небрежном или повторном клеймении, деформация оттиска до обжига сосуда. Различные сочетания этих факторов нередко делают распознавание символов и прочтение легенды клейма весьма непростой задачей. Общепринятые способы документирования и публикации амфорных клейм (фотография, зарисовка, графитовая протирка) часто не позволяют однозначно идентифицировать клеймо и обеспечить возможность внешней верификации предлагаемого прочтения его легенды. Вследствие этого среди специалистов по клеймам нередко возникают неразрешимые споры о достоверности и обоснованности предложенных идентификаций, что затрудняет введение клейм плохой сохранности в научный оборот и их использование в качестве надежных хронологических маркеров археологических комплексов. Решение этой проблемы, на наш взгляд, заключается в создании точных цифровых образов (трехмерных полигональных моделей) амфорных клейм и применении математических алгоритмов для визуализации геометрии поверхности моделей.

К настоящему времени в практике изучения надписей и изображений по их трехмерным моделям сложился комплекс методов и техник, позволяющих визуализировать элементы геометрии поверхности объекта исследования и тем самым облегчить его изучение и публикацию. В общем случае можно говорить о трех подходах к решению этой задачи:

- * анализ необработанной модели;
- * построение и анализ матриц высот модели;
- * построение и анализ карт кривизны модели.

Все три подхода не являются взаимоисключающими и могут успешно применяться в комплексе. Следует, однако, подчеркнуть, что, вне зависимости от применяемого подхода к визуализации, набора методов и техник, хорошие результаты могут быть получены только по моделям высокого качества. Необходимый уровень качества модели достигается методами, описанными нами в статье по результатам документирования серии из 359 амфорных клейм, происходящих из подводных раскопок в Керченском проливе (Свойский, Ольховский, Романенко, Зайцев, 2023). Этот массив был документирован фотограмметрическим способом, с использованием фотоаппарата с полнокадровой матрицей высокого разрешения, оснащенного длиннофокусным макрообъективом и накамерным осветителем. Комплекс примененных программных и аппаратных средств позволил получить трехмерные полигональные текстурированные модели клейм с дискретностью порядка 0,005 мм и точностью масштабирования в пределах 1%.

Работа с необработанной моделью

Изучение поверхности необработанной модели выполняется простейшими средствами визуализации поверхности, которые сводятся к включению и отключению цвета поверхности и эмуляции освещения этой поверхности под разными углами («метод затенений»). Подобным функционалом обладает целый ряд известных приложений - Geomagic, Meshlab, GigaMesh, Blender, Cinema4D и др. В простых случаях (а также при выборе оптимального способа изучения конкретного клейма) метод затенений и отключение цвета могут быть применены на модели пониженной детальности, адаптированной для публикации на интернет-ресурсе.

Цвет поверхности клейма может быть сохранен либо в виде растрового файла текстуры, наложенной на модель, либо путем присвоения цвета непосредственно полигонам модели. Оба эти способа имеют свои преимущества и недостатки, поэтому обычно применяются совместно: для каждой модели формируются файл в формате OBJ с текстурой в формате JPG и файл в формате PLY с колоризованными полигонами. В дальнейшем оба эти файла используются на разных этапах работы с моделью. Корректность цветопередачи обеспечивается достаточно



Рис. 1. Поверхность модели клейма с текстурой и без текстуры. Модель SF0091, 18 млн. полигонов.

Fig. 1. The surface of the stamp model with and without texture. SF0091 model, 18 million polygons

высоким разрешением файла текстуры (до 16384×16384 пикселей с JPG-текстурой, до 32768×32768 пикселей с PNG-текстурой) и высокой детальностью моделирования (чем меньше размер единичного полигона модели, тем более детально может быть передан цвет поверхности). Цвет поверхности керамического фрагмента, как правило, скорее мешает идентификации клейма и, в частности, прочтению легенды, поэтому в большинстве случаев изучение поверхности выполняется с отключением цвета. Но в отдельных случаях цвет может быть полезен – так, например, различного рода загрязнения на вогнутых участках оттиска могут способствовать прочтению.

Эмуляция освещения поверхности выполняется посредством математического алгоритма, вычисляющего яркость поверхности в зависимости от направления падения света. Перпендикулярные вектору освещения участки поверхности при этом окрашиваются в светлые тона, и чем больше угол между поверхностью и направлением вектора освещения, тем в более темный цвет окрашивается поверхность. Участки, оказывающиеся в тени, становятся наиболее темными. Для «подсветки» надписи, как правило, нужно «осветить» ее с разных направлений, манипулируя векторами одного или нескольких «источников света» (рис. 1).

Эмуляция освещения и управление цветом проводятся на первом этапе изучения модели. В относительно простых случаях этих средств достаточно для надежного прочтения легенды

клейма. В случае плохой читаемости легенды клейма, связанной с дефектами производства (малая глубина оттиска, стертость штампа, смазанность оттиска при небрежном нанесении, деформация до обжига) и/или внешними воздействиями (сколы, дезинтеграция нестойких минералов формовочной массы, гипергенная минерализация, биогенное разрушение), после анализа надписи с помощью этих средств, принимается решение о способах дальнейшего преобразования модели.

Построение матриц высот

Матрица высот модели амфорного клейма представляет собой регулярную сеть ячеек с шагом в диапазоне $0,010\text{--}0,005$ мм, каждому узлу которой присваивается значение высоты относительно условной плоскости, построенной субпараллельно поверхности амфорного клейма. Матрица высот строится на основе трехмерной полигональной модели. Для этого модель сначала выравнивается таким образом, чтобы вся поверхность клейма находилась в положении, максимально соответствующем плоскости координатных осей X и Y. Затем она преобразуется в облако точек, на основе которого рассчитывается матрица высот.

Визуализация матрицы высот выполняется посредством присвоения условных цветов узлам сети ячеек в зависимости от геометрии поверхности. Этот цвет может быть определен (1) высотой поверхности относительно плоскости, субпараллельной этой поверхности, (2) углом наклона поверхности и (3) направлением наклона поверхности. Алгоритмы присвоения цвета могут быть тонко настроены, а читаемость легенды дополнительно улучшена изменением вектора освещения поверхности. Кроме того, матрица высот представляет собой удобный инструмент для измерения глубины штампа и, при необходимости, построения поперечных профилей отдельных гаск литер легенды клейма. Применение матриц высот, как и анализ непреобразованных моделей, достаточно эффективны для относительно хорошо сохранившихся клейм. Комбинация различных способов присвоения условного цвета позволяет сформировать серию растровых рендеров, иллюстрирующих геометрию клейма. Однако для клейм плохой сохранности этот метод недостаточно эффективен, так как не позволяет обеспечить высокую контрастность на наиболее сглаженных участках поверхности (рис. 2).

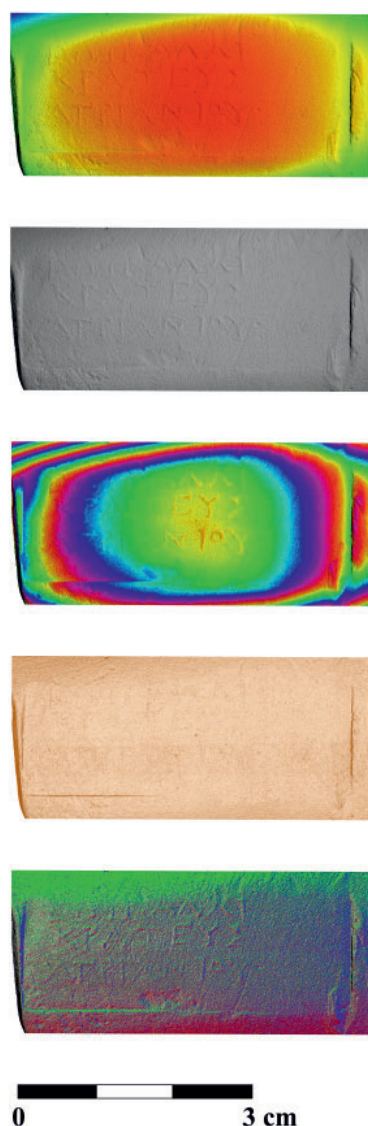


Рис. 2. Матрица высот, построенная на основе трехмерной полигональной модели. Исходная модель SF0091, 18 млн. полигонов, дискретность матрицы высот 0,005 мм, коэффициент масштабирования координаты Z $\times 8$. Схемы визуализации для матрицы высот: (1) по относительной высоте тепловая, (2) по относительной высоте градиентная, (3) по относительной высоте спектральная с многократным повторением спектра (4) по углу наклона поверхности, (5) по направлению наклона поверхности.

Fig. 2. Altitude matrix based on 3D polygonal model. Initial SF0091 model, 18 million polygons, the discreteness of the altitude matrix is 0.005 mm, the scaling factor of the Z $\times 8$ coordinate. Visualization schemes for the altitude matrix: (1) thermal in relative height, (2) gradient in relative height, (3) spectral in relative height with multiple repetition of the spectrum (4) by surface tilt angle, (5) by surface tilt direction.



Рис. 3 Результат применения алгоритма «масштабирование сияния» в ПО MeshLab. (1) Модель SF0091, 18 млн. полигонов и (2) модель SF0020, 15 млн. полигонов.

Fig. 3. The result of applying the "radiance scaling" algorithm in MeshLab software. (1) SF0091 model, 18 million polygons and (2) SF0020 model, 15 million polygons

Построение карт кривизны

Построение карт кривизны, вероятно, является самым эффективным способом визуализации поверхности амфорных клейм, решающим как задачи их прочтения, так и публикации. В общем случае этот способ заключается в присвоении псевдоцветов вогнутым и выпуклым участкам поверхности модели, что может быть реализовано различными способами.

Вероятно, наиболее распространенным способом построения карт кривизны является применение алгоритма «масштабирование сияния» (Radiance Scaling), основанного на принципе расчета характера отражения света от выпуклой и вогнутой поверхности (Подробнее см. Vergne, Pacanowski, Barla, Reuter, 2012, P. 417–421). Причиной распространенности этого алгоритма является не столько его эффективность, сколько то, что он реализован в программном обеспечении MeshLab и не требует предварительных преобразований модели. Эта реализация имеет ряд ограничений, связанных с плохой адаптацией MeshLab для работы с моделями высокой детальности, а также с невозможностью настроить некоторые параметры визуализации, в особенности - разрешение изображения. Тем не менее, эксперименты с алгоритмом «масштабирование сияния» в реализации MeshLab показали принципиальную возможность применения

карт кривизны поверхности для исследования амфорных клейм плохой сохранности (рис. 3).

Более перспективным для практического применения представляется алгоритм «мультимасштабного интегрального инварианта» (Multi Scale Integral Invariant, далее – MSII), разработанный Хубертом Мара для улучшения читаемости клинописных текстов (Mara, 2012) и надписей и реализованный в программном обеспечении GigaMesh (GigaMesh.eu). Этот алгоритм осуществляет пересчет трехмерной модели таким образом, чтобы для каждого узла модели было рассчитано значение вектора кривизны поверхности. Это значение затем визуализируется множеством способов, допускающих достаточно тонкую настройку и, тем самым, обеспечивающих хорошую контрастность псевдоцветов, назначаемых полигонам модели.

Для вычисления интегрального инварианта трехмерной полигональной модели используется метод сферических сегментов, который заключается в создании сфер разного радиуса с центром в каждом узле модели. Радиус каждой сферы рассчитывается делением максимального радиуса на число сфер, т.е. если задается 4 сферы с радиусом максимальной сферы 1 мм, то создаются сферы с радиусом 0,25, 0,5, 0,75, 1 мм. Число сфер может быть задано через степень числа 2 (2, 4, 8, 16, 32 и т.д.). Затем производится расчет кривизны поверхности модели относительно сегмента каждой сферы. Результатом становятся рассчитанные для каждого узла модели векторы, элементы которых представляют собой значения кривизны для сфер разного радиуса, построенных с центром в каждом узле модели.

Радиус максимального сферического сегмента определяет размер элемента поверхности, который должен быть выявлен на модели с помощью алгоритма. Поэтому радиус расчета определяется конкретной целью расчета и не должен задаваться меньше предполагаемого минимального размера элемента поверхности, подлежащего выявлению. Соответственно радиус расчета, применительно к эпиграфическим памятникам, упрощенно определяется шириной линий начертания надписи. При этом, если визуализируемая надпись или изображение состоят из линий различной ширины, может оказаться необходимым применение нескольких радиусов

расчета. Кроме того, практика применения алгоритма MSII показывает, что для целей анализа и публикации зачастую необходимы преобразованные модели, рассчитанные по нескольким радиусам.

Расчет интегрального инварианта трехмерной полигональной модели требует значительного объема вычислений и может быть выполнен лишь достаточно мощными компьютерами при затрате существенных ресурсов машинного времени. Практика показала, что для преобразования относительно небольшой модели, состоящей из 15 млн. полигонов, в зависимости от применяемого процессора, требуется¹:

* Intel(R) Core(TM) i9-10980XE, 14 нм, 3.00 GHz, 18 ядер, 36 потоков – 5 часов

* Intel(R) Core(TM) i9-13900 10 нм, 2.00 GHz, 24 ядра, 32 потока – 10 часов

* Intel(R) Core(TM) i7-7820X 14 нм, 3.60 GHz, 8 ядер, 16 потоков – 13 часов

* Intel(R) Core(TM) i7-11800H, 10 нм, 2.30 GHz, 8 ядер, 16 потоков – 20 часов

Анализ конфигурации примененного вычислительного оборудования показывает, что скорость расчета практически не зависит от объема установленной на компьютере оперативной памяти и характеристик графического процессора (во всех случаях использовались компьютеры с объемом оперативной памяти не ниже 32 Гб и видеокартами NVidia GeForce RTX разных поколений). Критически важным, однако, является число потоков обработки данных, количество ядер процессора и его тактовая частота.

Простейшие расчеты показывают, что даже на самом мощном из имеющихся в нашем распоряжении компьютеров расчет массива из 300 моделей занимает 1500 часов, т.е. более 2 месяцев непрерывной работы компьютера. При использовании менее производительных процессоров это время возрастает в 2-4 раза – т.е. до 4-8 месяцев, что делает метод непригодным для массового применения. Быстродействие алгоритма расчета, помимо возможностей вычислительного оборудования, зависит от (1) числа полигонов модели, (2) радиуса расчета и (3) числа расчетных сфер. Как следствие, практическая пригодность алгоритма к внедрению на массовом материале может быть обеспечена в основном управлением этими тремя параметрами.

Размер модели, выражаемый через число составляющих ее полигонов, в имеющейся выборке варьируется от 4 до 70 млн., при среднем размере 19 млн. полигонов. Преобразование исходной модели путем механического уменьшения числа полигонов технически возможно посредством задания размера единичного полигона. При документировании серии амфорных клейм из раскопок на Ак-Буруне фактический размер полигона исходной мастер-модели составляет 0,005-0,010 мм. Теоретически дискретность модели может быть уменьшена путем увеличения размера полигона до, например, 0,02-0,05 мм, но это неизбежно приведет к сглаживанию мелких деталей рельефа поверхности. Применение алгоритмов визуализации на модели недостаточной детальности бессмысленно, так как «анализировать становится нечего». Определить же «универсальный» размер полигона, гарантированно обеспечивающий читаемость легенды любого клейма, не представляется возможным вследствие достаточно высокой вариативности изучаемого материала.

На наш взгляд, увеличение производительности расчета рациональнее обеспечивать не снижением детальности исходных данных, а настройкой алгоритма – т.е. подбором параметров расчета, обеспечивающих хорошую контрастность изучаемого трехмерного изображения. Для этого можно оперировать двумя параметрами – радиусом расчета и числом расчетных сфер.

В рамках исследования серии амфорных клейм, найденных при подводных раскопках на Ак-Буруне и в Фанагории, для выборки из 3 клейм с различным начертанием легенды, имеющих разнородные повреждения (затертость, смазанность, дезинтеграция нестойких минералов формовочной массы, гипергенная минерализация) была выполнена серия преобразований с различным радиусом расчета – 0,2, 0,5, 1 и 2 мм.

Оказалось, что все 4 опробованных варианта расчета позволяют получить результат, в той или иной степени пригодный для надежного прочтения легенды клейма и подтверждения этого прочтения иллюстративным материалом. Наилучшие результаты были получены при радиусах 0,5 мм и 1 мм. При расчете с радиусом 0,2 мм лучше выявляются мелкие элементы рельефа поверхности, одна-



Рис. 4 Сопоставление результатов расчета MSII в ПО GigaMesh при радиусах (1) 0,2 мм, (2) 0,5 мм, (3) 1 мм, (4) 2 мм. Модель SF0022, 20 млн. полигонов. Метод расчета Feature Vector, нормальное представление.

Fig. 4. Comparison of MSII calculation results in GigaMesh software at radii (1) 0.2 mm, (2) 0.5 mm, (3) 1 mm, (4) 2 mm. SF0022 model, 20 million polygons. Feature Vector calculation method, normal representation

ко результат неудобен для публикации, так как при уменьшении изображения до размера 1:1 эти элементы смазываются. Шаг 2 мм, наоборот, позволяет получить отличное изображение для публикации, однако для анализа это изображение менее пригодно, так как мелкие элементы рельефа теряются. Мнимый парадокс – «загрубление улучшает читаемость» – объясняется тем, что при увеличении ради-



Рис. 5 Сопоставление результатов расчета MSII в ПО GigaMesh при числе сфер (1) 16 и (2) 4. Модель SF0091, 18 млн. полигонов, радиус расчета 0,5 мм. Метод расчета Feature Vector, нормальное представление.

Fig. 5. Comparison of MSII calculation results in GigaMesh software with the number of spheres (1) 16 and (2) 4. SF0091 model, 18 million polygons, calculation radius 0.5 mm. Feature Vector calculation method, normal representation.

уса расчета до значения, несколько превышающего «значение оптимального отображения кривизны», происходит некоторая генерализация изображения и отфильтровывается «шум», создаваемый неоднородностями формовочной массы керамического фрагмента (рис. 4).

По умолчанию расчет вектора значений кривизны поверхности в ПО GigaMesh выполняется по 16 сферам. Экспериментальное уменьшение числа сфер до 4 показало², что для исследуемого материала существенной деградации контрастности трехмерного изображения не происходит (рис. 5), но производительность вычислений существенно увеличивается.

С учетом результатов экспериментов с изменением радиуса расчета и числа сфер подход к применению алгоритма MSII был переосмыслен. Исходный подход предполагал для каждой модели расчет 4 вариантов (радиусы 0,2 мм, 0,5 мм, 1 мм и 2 мм) для 16 сфер с последующей отбраковкой избыточных результатов. Однако такой подход требует неприемлемых затрат машинного времени и человеческого труда. Модифицированный техпроцесс основывается на расчете одного варианта с радиусом расчета 0,5 мм для 4 сфер с последующим дополнительным расчетом при других радиу-

сах и другом числе сфер расчета в тех случаях, когда базовый вариант оказывается недостаточным. Такой подход вполне себя оправдал и позволил выполнить основной объем преобразований интегрального инварианта за три машино-месяца, т.е. несколько более 100 моделей за машино-месяц³.

Визуализация результатов

Расчет интегрального инварианта моделей создает источниковую базу для анализа (в первую очередь для прочтения легенд клейм), но преобразованные модели не могут быть полноценно использованы без подбора оптимальных способов визуализации результатов моделирования. При динамической визуализации, используемой для прочтения легенд и распознавания эмблем, важна максимальная контрастность изображения и возможность тонкой настройки контрастности по одному или нескольким параметрам. При статической визуализации формируется набор растровых рендеров, подтверждающих корректность идентификации и пригодных для электронной и полиграфической публикации. При этом необходимо принимать меры к минимизации деградации электронного изображения при его уменьшении до натуральной величины клейма. Подготовка этого массива иллюстраций должна быть оптимизирована таким образом, чтобы избежать индивидуального формирования каждого растрового рендера, т.е. параметры формирования рендера должны быть максимально унифицированы.

Функционал визуализации результатов расчета интегрального инварианта полигональной модели, реализованный в ПО GigaMesh, весьма обширен. Визуализация основана на 12 базовых цветовых схемах (Morgensterning, Hot, Cold, Grayscale, YlOrBr, Copper, Sienna, Rust, RdGy, Spectral, RdYlGn, Parula), построенных на принципах обеспечения максимальной контрастности изображения. Мы выбрали для визуализации вектора кривизны три способа (Feature Vector, Feature Distance, Feature Element), каждый из которых дополнительно настраивался (рис. 6 и рис. 7). Возможности настройки включают смещение середины цветовой шкалы, дополнительный пересчет относительно выбранного значения и инвертирование цвета. Эксперименты с различными способами визуализации показали, что все 12 цветовых схем решают задачу улучшения читаемости легенды клейма и ни

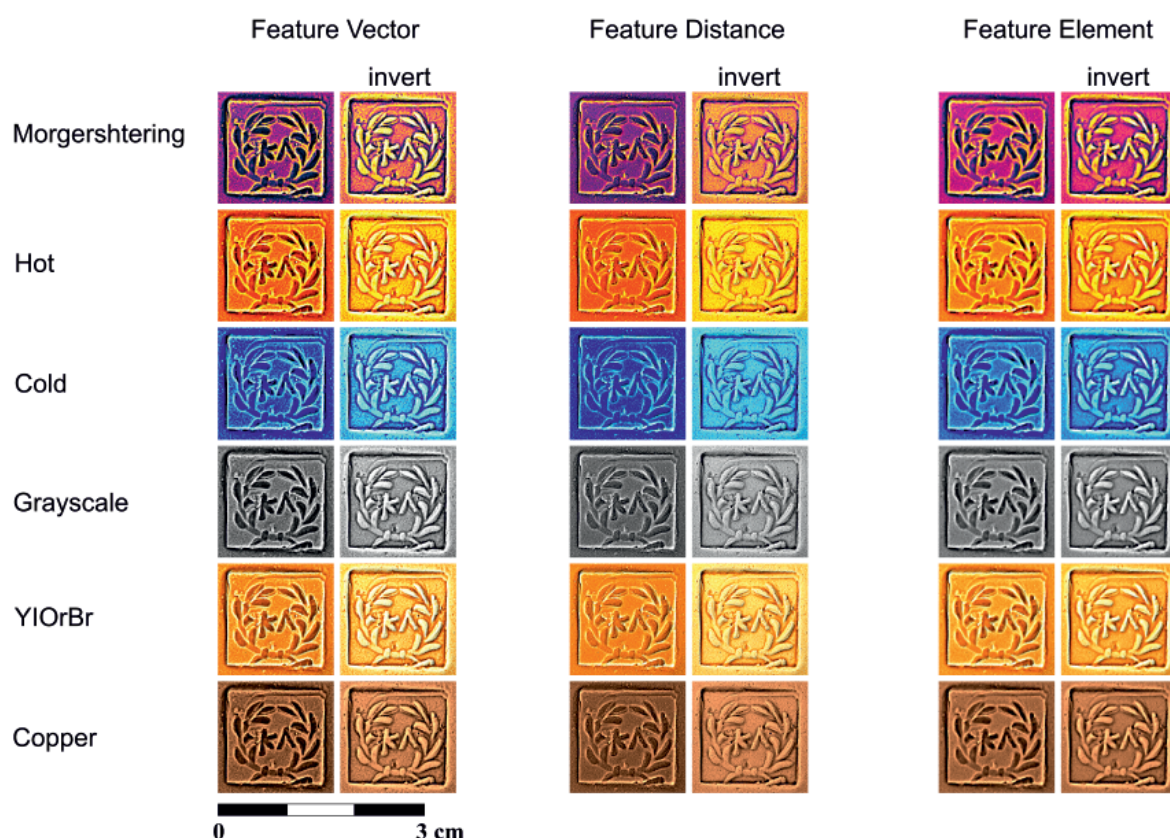


Рис. 6 Визуализация результатов расчета интегрального инварианта в ПО GigaMesh. Модель SF0023, 5 млн. полигонов, радиус расчета 0,5 мм. Расчет визуализации в 6 цветовых схемах (Morgershtering, Hot, Cold, Grayscale, YIOBr, Copper), тремя способами (Feature Vector, Feature Distance, Feature Element), нормальное (слева) и инвертированное (справа) представление.

Fig. 6. Visualization of the calculation results of the integral invariant in GigaMesh software. SF0023 model, 5 million polygons, calculation radius 0.5 mm. Calculation of visualization in 6 colour schemes (Morgershtering, Hot, Cold, Grayscale, YIOBr, Copper), in three ways (Feature Vector, Feature Distance, Feature Element), normal (left) and inverted (right) representation.

одна из них не имеет несомненных преимуществ. На этапе исследования клейма выбор базовой цветовой схемы определяется скорее эстетическими предпочтениями исследователя, чем практическими соображениями. Однако для сложных клейм плохой сохранности рекомендуется использование нескольких цветовых схем, нескольких способов расчета, инвертирование результата визуализации. Подготовка иллюстративных материалов для публикации клейм требует несколько иного подхода. На наш взгляд, эти материалы должны быть подготовлены таким образом, чтобы:

- * Облегчить визуальное сопоставление иллюстраций с ранее опубликованными материалами, подготовленными традиционными способами (графитовая протирка, зарисовка, прорисовка по фотографии, монохромная фотография).

- * Обеспечить возможность достаточно экономичной полиграфической публикации,

при которой неизбежны некоторые потери разрешения исходного цифрового изображения.

- * Обеспечить возможность быстрой подгрузки цифровых изображений при доступе к базе данных посредством сети Интернет.

Исходя из этих соображений, мы вынуждены отказаться от полихромных цветовых схем и при подготовке результатов расчета интегрального инварианта моделей для массовой публикации использовать только монохромную цветовую схему Grayscale, визуализирующую кривизну поверхности оттенками серого цвета. Эксперименты показали, что оптимальными для прочтения и публикации клейм являются три способа расчета формирования растрового рендера:

- * Расчет значения цвета по максимальному значению вектора, вне зависимости от того, для какой сферы он рассчитан (способ

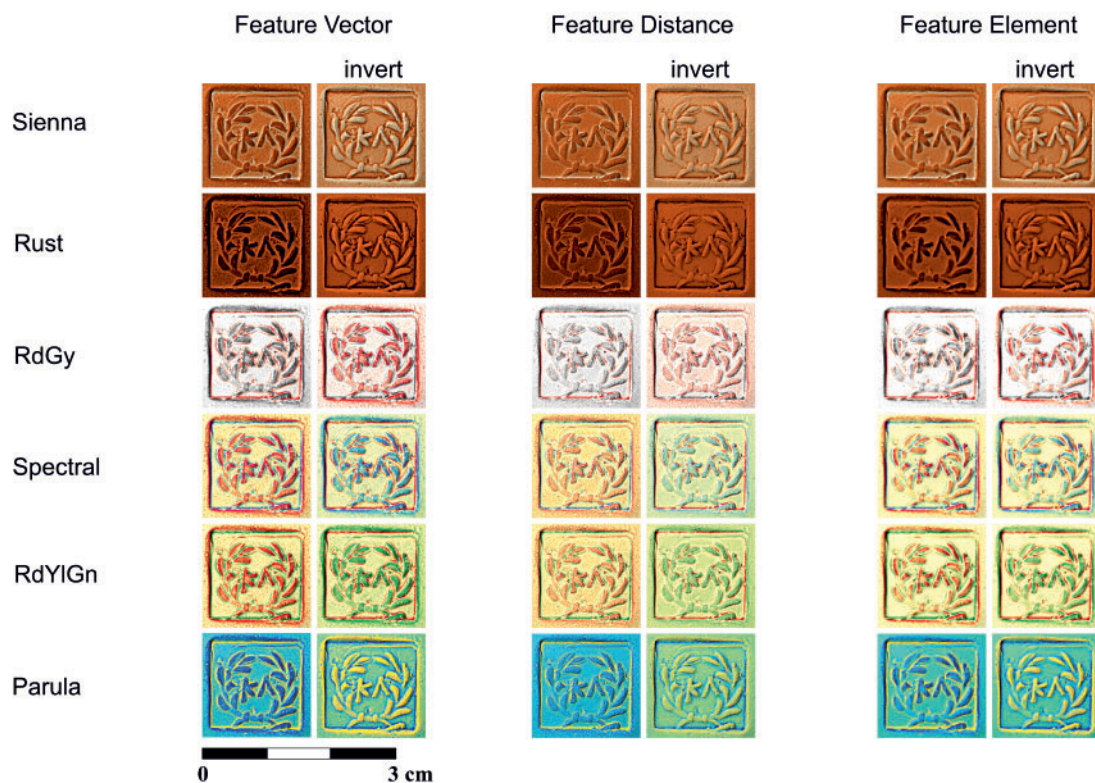


Рис. 7. Визуализация результатов расчета интегрального инварианта в ПО GigaMesh. Модель SF0023, 5 млн. полигонов, радиус расчета 0,5 мм. Расчет визуализации в 6 цветовых схемах (Sienna, Rust, RdGy, Spectral, RdYlGn, Parula), тремя способами (Feature Vector, Feature Distance, Feature Element), нормальное (слева) и инвертированное (справа) представление.

Fig. 7. Visualization of the calculation results of the integral invariant in GigaMesh software. SF0023 model, 5 million polygons, calculation radius 0.5 mm. Calculation of visualization in 6 colour schemes (Sienna, Rust, RdGy, Spectral, RdYlGn, Parula), in three ways (Feature Vector, Feature Distance, Feature Element), normal (left) and inverted representation

Feature Vector). В этом случае формируется усредненное (неоптимизированное) изображение, показывающее как более мелкие, так и более крупные детали. Такой способ расчета рассматривается как универсальный и оптимален на первом этапе изучения клейма.

* Расчет значения цвета относительно произвольно выбранного узла модели, расположенного рядом с литерами легенды и, одновременно, имеющего относительно низкое значение вектора кривизны (способ Feature Distance). В этом случае интенсивность цвета пересчитывается относительно наименее искривленной поверхности, что дает улучшение контрастности изображения на литерах легенды. Этот способ расчета представляет собой адаптацию к геометрии конкретного клейма и обеспечивает наилучшее прочтение литер.

* Расчет значения цвета по максимальному значению вектора для одной сферы

(способ Feature Element), при этом используется самая большая сфера. Такой вариант оптимален для визуализации относительно крупных форм рельефа поверхности. Мелкие детали (в основном связанные с разрушением менее стойких к выветриванию минералов формовочной массы) при этом теряются и при увеличении изображения относительно естественных размеров клейма рендер получается несколько размытым. Однако именно это изображение представляется оптимальным для публикации полиграфическим способом.

Для каждого из этих вариантов формируется нормальное и инвертированное изображение, так что в конечном итоге каждое клеймо получает 6 растровых рендеров карты кривизны. Формирование растровых рендеров производится вручную, но временные затраты для создания пакета изображений на одну модель остаются приемлемыми (4-8 минут). Возможность электронной публикации в размещен-

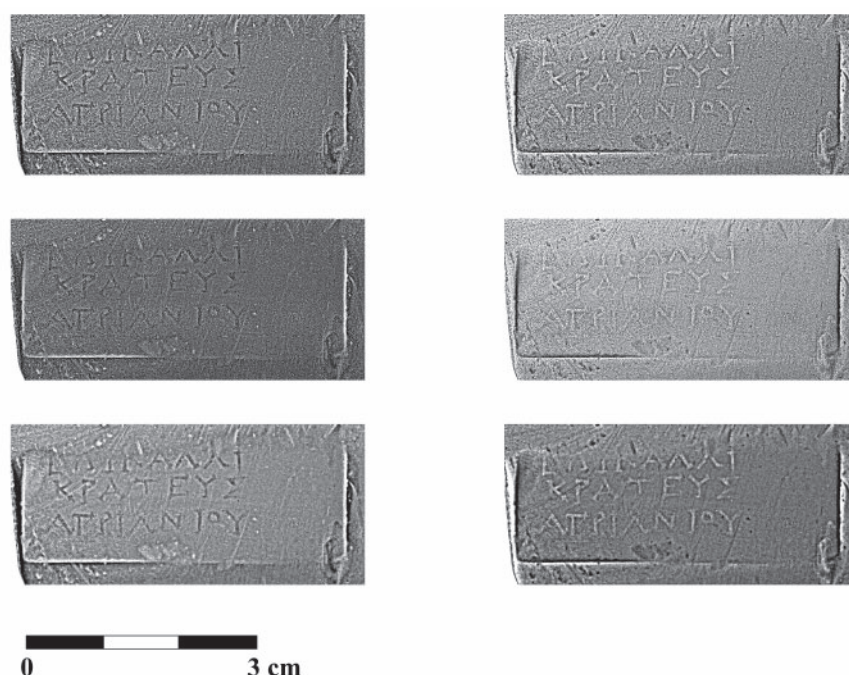


Рис. 8. Шесть вариантов визуализации результатов расчета MSII, предназначенных для публикации полиграфическим и электронным способами. Модель SF0091, 18 млн. полигонов, радиус расчета 0,5 мм, методы расчета Feature Vector, Feature Distance, Feature Element (сверху вниз), нормальное (слева) и инвертированное (справа) представление.

Fig. 8. Six options for visualizing the results of the MSII calculation for publication electronically and in print. SF0091 model, 18 million polygons, calculation radius 0.5 mm, calculation methods Feature Vector, Feature Distance, Feature Element (from top to bottom), normal (left) and inverted (right) representation.

ной на онлайн-ресурсе базе данных позволяет показать все 6 вариантов визуализации клейм (рис. 8). При подготовке полиграфической публикации исследователь выбирает из вариантов тот рендер, который наилучшим образом отображает детали рельефа поверхности.

Выводы

Алгоритм мультимасштабного интегрального инварианта является перспективным инструментом исследования и публикации амфорных клейм, в первую очередь трудночитаемых. Его применение требует высокого качества документирования и моделирования (что, впрочем, обычно для практически любого аналитического метода), мощного вычислительного оборудования и существенных затрат машинного времени. Программное обеспечение, реализующее этот алгоритм, постоянно развивается и предоставляет

все более широкие возможности по управлению визуализацией результатов расчета. По нашему мнению, в обозримом будущем применение алгоритма MSII позволит получить верифицируемые прочтения не только амфорных клейм, но и ряда других эпиграфических памятников, ранее считавшихся нечитаемыми. Не менее важной представляется и возможность получения с помощью этого алгоритма растровых рендеров, пригодных для полиграфической публикации изображений, плохо воспроизводимых фотографическим способом. В конечном итоге, внедрение в практику эпиграфических исследований преобразования трехмерных моделей алгоритмом мультимасштабного интегрального инварианта позволит окончательно отказаться от использования аналоговых методов – зарисовки, графитовой протирки, эстампажа.

Примечания:

¹ В этом эксперименте расчет выполнялся при радиусе 2 мм, с расчетом 16 сфер.

² Эксперимент выполнялся для выборки из 98 моделей, которые рассчитывались с одинаковым значением радиуса расчета для 16 и для 4 сфер (94 модели с радиусом расчета 0,5 мм, 2 модели с радиусом расчета 1 мм и 2 модели с радиусом расчета 2 мм).

³ Это число не включает машинное время, израсходованное на экспериментальные расчеты.

Благодарности:

Авторы выражают признательность доктору Хуберту Мара за разработку прекрасного инструмента, позволяющего продвинуться в решении ряда острых проблем эпиграфических исследований.

В документировании, фотограмметрической обработке, трехмерном моделировании, преобразовании моделей методом MSII, формировании растровых рендеров моделей, помимо авторов статьи, принимали участие А. Н. Уральская, П. А. Мосалева и М. А. Никитина.

Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам ГБУ РК «Восточно-Крымский историко-культурный музей-заповедник» Т. В. Умрихиной, Н. В. Быковской, Е. В. Болонкиной.

ЛИТЕРАТУРА

Свойский Ю.М., Ольховский С.В., Романенко Е.В., Зайцев А.В. О методике массового бесконтактного документирования амфорных клейм // КСИА. 2023. № 270. С. 370–383.

Vergne R., Pacanowski R., Barla P., Granier X., Reuter P. Enhancing surface features with the Radiance Scaling Meshlab Plugin // Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). 2012. Mar 2012. P. 417–421.

Mara H. Multi-Scale Integral Invariants for Robust Character Extraction from Irregular Polygon Mesh Data. PhD thesis. Heidelberg, Germany, 2012. 210 p.

GigaMesh.eu. URL: <https://www.gigamesh.eu/> (дата обращения: 20.11.2023).

Информация об авторах:

Свойский Юрий Михайлович, Лаборатория RSSDA; Институт классического Востока и античности, Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики. (г. Москва, Россия); rutil28@gmail.com.

Ольховский Сергей Валерьевич, заведующий Центром подводного археологического наследия, Институт археологии РАН (г. Москва, Россия); uwiaran@gmail.com

Романенко Екатерина Васильевна. Лаборатория RSSDA (г. Москва, Россия); eromanenko@yandex.ru

Зайцев Антон Витальевич, младший научный сотрудник Института цифровых гуманитарных инициатив, Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики; лаборант Центра подводного археологического наследия, Институт археологии РАН (г. Москва, Россия); Лаборатория RSSDA; antinanqo@gmail.com

Гирич Анна Павловна, лаборант Центра подводного археологического наследия, Институт археологии РАН (г. Москва, Россия); Лаборатория RSSDA; girichap20@gmail.com

REFERENCES

Svoyskiy, Yu. M., Olkhovskiy S. V., Romanenko E. V., Zaytsev A. V. 2023. In *Kratkie soobshcheniia Instituta arkheologii (Brief Communications of the Institute of Archaeology)* 270, 370–383 (in Russian).

Vergne, R., Pacanowski, R., Barla, P., Granier, X., Reuter, P. 2012. In *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA)* (3), 417–421.

Mara, H. 2012. *Multi-Scale Integral Invariants for Robust Character Extraction from Irregular Polygon Mesh Data*. PhD thesis. Germany, Heidelberg.

GigaMesh.eu. Available at: URL: <https://www.gigamesh.eu/> (accessed 20.11.2023).

About the Authors:

Svoiskiy Yuriy M., RSSDA Laboratory. Moscow, Russian Federation; HSE University. Pokrovsky boulevard, 11, Moscow, 109028, Russian Federation; rutil28@gmail.com.

Olkhovsky Sergei V., Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences. Dmitry Ulyanov St., 19, Moscow, 117036, Russian Federation; uwiaran@gmail.com

Romanenko Ekaterina V. RSSDA Laboratory. Moscow, Russian Federation; eromanenko@yandex.ru

Zaitsev Anton R., HSE University. Pokrovsky boulevard, 11, Moscow, 109028, Russian Federation; Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences. Dmitry Ulyanov St., 19, Moscow, 117036, Russian Federation; RSSDA Laboratory. Moscow, Russian Federation; antinanqo@gmail.com

Girich Anna P., Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences. Dmitry Ulyanov St., 19, Moscow, 117036, Russian Federation; RSSDA Laboratory. Moscow, Russian Federation; girichap20@gmail.com



Статья поступила в журнал 01.10.2024 г.
Статья принята к публикации 01.12.2024 г.
Авторы внесли равноценный вклад в работу