УПРАВЛЕНИЕ ПО ГОСУДАРСТВЕННОЙ ОХРАНЕ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН
ИНСТИТУТ АРХЕОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ, ЯЗЫКА И ЛИТЕРАТУРЫ
УФИМСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА РАН
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР ПО ОХРАНЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
НЕДВИЖИМЫХ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН
КОМИТЕТ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН ПО ДЕЛАМ ЮНЕСКО
ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНЫЙ МУЗЕЙ-ЗАПОВЕДНИК «ПЕЩЕРА ШУЛЬГАН-ТАШ»

Материалы III Международного симпозиума

МУЗЕЕФИКАЦИЯ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Бурзянский район Республики Башкортостан
(8–9 июня 2017 года)

Уфа – 2018

УДК 502.8:903:069.8
ББК 63.4:79.1
М 89

Утверждено к печати экспертной комиссией Научно-производственного центра по охране и использованию недвижимых объектов культурного наследия Республики Башкортостан

Редакционная коллегия:
Д.А. Гайнуллин, Г.В. Булякова, И.И. Буляков, Ш.В. Нафиков

«Музеефикация историко-культурного наследия: теория и практика». Материалы III Международного научного симпозиума. Уфа: ГБУ НПЦ РБ, 2018. – 202 стр. с илл.

«Museification of historical and cultural heritage: theory and practice». Materials of the III International Scientific Symposium. Ufa: SBI SPC RB, 2018 (202 pages).

ISBN 978-5-91608-161-9

Рецензенты:
доктор исторических наук, проф. *Е.Г. Дэвлет*
доктор исторических наук, проф. *Б.А. Азнабаев*

© ГБУ НПЦ РБ, 2018
© Авторы статей, 2018
© Переводы Ш.В. Нафиков, Л.Ф. Сахибгареева, 2018

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА СКАЛАХ

Е.Г. Дэвлет[1], А.Р. Ласкин[1, 2], А.С. Пахунов[1], Е.В. Романенко[3], Ю.М. Свойский[3]

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-29-04389

Введение

За последнюю четверть века цифровое документирование петроглифов, в том числе трехмерное моделирование, вполне вошло в повседневную практику исследователей наскального искусства.

Совершенствование техник документирования, «трехмерность» как способ представления материала, возможность 3D-печати и демонстрации результатов в Интернете зачастую становятся самоцелью, а развитию методов анализа поверхности моделей уделяется существенно меньше внимания. Набор средств, используемых при работе с моделями поверхности валунов и скальных выходов с петроглифами, остается ограниченным, недостаточно используются алгоритмы визуализации формы поверхности модели. При этом теряется потенциал выявления на трехмерной модели плохо сохранившихся изображений, уточнения контуров известных изображений, не полностью реализуются возможности визуализации результатов исследования.

Эффективность анализа трехмерных моделей напрямую определяется корректной и четкой постановкой задачи на документирование и моделирование, тщательностью исполнения полевого (правильный выбор оборудования, соблюдение технологии и адаптация ее к памятнику) и всех последующих этапов камеральной обработки.

Представим в качестве примера результаты работы с объектом, известным по документации А.П. Окладникова как камень 65 Сикачи-Аляна [6, рис. 2]. Петроглифы Сикачи-Аляна – уникальные наскальные изображения, нанесенные преимущественно выбивкой, реже резьбой, на отдельно лежащие базальтовые валуны и скальные обрывы в пойме р. Амур. Хронология памятника охватывает широкий временной интервал от начального неолита до средневековья. Для исследования петроглифов был применен комплекс методов, основанный на применении алгоритмов визуализации к поверхности трехмерных полигональных моделей, сформированных фотограмметрическим способом.

Общие принципы документирования

Наиболее практичным и эффективным способом полевого документирования петроглифов является технология цифровой фотограмметрии (также SfM от structure from motion), хорошо разработанная и представленная в многочисленных публикациях [1]. Технология цифровой фотограмметрии позволяет получать

[1] Институт археологии Российской Академии наук (Москва, Россия).
[2] Центр охраны памятников истории и культуры» Хабаровского края (Хабаровск, Россия).
[3] Лаборатория RSSDA (Москва, Россия).

высокодетальные, размерные и ориентированные трехмерные полигональные модели (ТПМ), пригодные для анализа микрорельефа поверхности.

Для каждого объекта (валуна или скального выхода с петроглифами) методика съемки и обработки продумывается отдельно, с учетом его особенностей – доступности, размеров, геометрии, состояния поверхности, наличия на поверхности мхов и лишайников, техники выполнения наскального изображения. Общие требования предполагают, что документированию подлежит ограниченная, как правило, трещинами или углами скальной поверхности плоскость с изображениями, предварительно уже выявленными или потенциально предполагаемыми. Но на деле определение границ является сложной задачей. Идеальным решением является сплошное детальное документирование всех участков концентрации уже выявленных петроглифов, а равно и всех потенциально пригодных для нанесения изображений плоскостей, в особенности подвергшихся интенсивному деструктивному воздействию. Подобный подход гарантирует выявление большинства плохо сохранившихся изображений, однако при планировании работ их объемы определяются практическими реалиями: документирование значительных площадей с абсолютной детальностью требуют не менее абсолютных трудозатрат и времени.

Применительно к валунам амуро-уссурийской провинции наскального искусства целесообразно документировать камень целиком, даже если изображения располагаются только на одной из его поверхностей [2; 3; 5; 7].

Безразмерные неориентированные модели низкой детальности годны лишь для визуализации памятника и могут быть использованы в целях популяризации. В этом легко убедиться, изучив любую низкополигональную модель с отключенной текстурой из доступных на сервисе Sketchfab (www.sketchfab.com). Эмпирический опыт предшествовавших работ по съемке петроглифов и эпиграфических памятников показал, что минимальная детальность модели, достаточная для анализа поверхности, обычно составляет не менее 2 000 полигонов (треугольников) триангуляционной сети на 1 см^2. Для сложных случаев (прежде всего – для плохо сохранившихся поверхностей) детальность модели может быть увеличена до 5 000 полигонов на 1 см^2. Дальнейшее ее увеличение, вследствие ограничений исходных данных, получаемых с современных цифровых камер, в общем случае не приводит улучшению реальной детальности модели. Ограничивающим параметром обеспечения детальности моделей являются возможности современного вычислительного оборудования. Имеющийся в нашем распоряжении компьютерный парк позволяет нормально обрабатывать модели в 70–80 млн полигонов, модели большего размера становятся трудноуправляемыми.

На практике это означает что в настоящее время моделирование с достаточной детальностью (2 000 полигонов на 1 см^2) может быть выполнено для поверхностей площадью до 3,5 м^2, а при увеличении детальности до 5 000 полигонов на 1 см^2 – не более 1,5 м^2. Между тем петроглифы Амуро-Уссурийской провинции

наскального искусства выявляются либо на обширных скальных поверхностях площадью иногда в десятки квадратных метров, либо на достаточно крупных валунах с площадью поверхности от 2 до 14 м^2.

Эта проблема может решаться тремя способам.

Первый вариант – формировать модель всей поверхности с максимально возможной (хотя бы и недостаточной для анализа) детальностью, выделять на ней зоны с изображениями и на эти зоны вновь формировать высокодетальные модели. Способ достаточно производителен, однако пригоден лишь для документирования достоверно известных петроглифов и не пригоден для выявления неизвестных ранее.

Второй вариант – разбивать модель на части, ограниченные трещинами и не превышающие 70 млн (а лучше 50 млн) полигонов и в дальнейшем работать с этими фрагментами. Метод гарантирует выявление новых изображений на обширных скальных поверхностях, но более трудоемок на всех этапах съемки и обработки.

Третий вариант – создавать модель переменной детальности, в которой для участков с рисунками плотность полигонов составляет заведомо больше, чем минимально-допустимое значение, а для остальной поверхности камня лишь загрубленно передает его общую геометрию. Его можно считать оптимальным для валунов, на которых площадь поверхности с рисунками составляет незначительную долю общей поверхности камня.

Объект исследования

У верхней границы низкой поймы реки Амур, в зоне, защищенной небольшим базальтовым мысом, расположен камень размерами 2,6х1,8х0,8 м, его объем около 3,5 м^3, ориентировочный вес составляет не менее 10 т. Камень грубо окатан и отчасти покрыт мхами и лишайникам. Состояние поверхности камня и степень покрытия его растительностью показывает, что он в течение длительного времени не подвергался экзарационному воздействию речного льда во время ледоходов, мало подвержен воздействию воды во время «нормальных» паводков. Тем не менее, при катастрофических летних паводках камень полностью заливается (рис. 1).

На обращенной к востоку сглаженной поверхности камня А.П. Окладниковым выявлено 2 наскальных изображения, объект по нумерации исследования получил номер 65 [6, рис. 2]. С его поверхности были дважды сняты эстампажи, по которым были выполнены прорисовки. Ориентация изображений дает основания предполагать, что камень находится в перевернутом положении и иные изображения могут быть выявлены только на поверхности, обращенной в настоящее время вниз. Морфология наблюдаемой поверхности камня, за исключением «гладкого» участка с петроглифами, неблагоприятна для их нанесения, поэтому после осмотра камня было принято решение мхи и лишайники не удалять, тем более что их наличие и состояние являются надежными индикаторами воздействия воды и льда.

Документирование

Для документирования доступной части поверхности камня 65 было сделано 1 193 цифровых фотографий. Съемка выполнялась цифровым фотоаппаратом Nikon D700 с полнокадровой матрицей 7 952 x 5 304 (12,1 мегапискселя), оснащенным объективом Nikon 35 мм f/2D Nikkor с кольцевым осветителем Grifon AR400 в пасмурную погоду. Это обеспечило равномерность освещения поверхности камня и отсутствие теней. Цветокоррекция выполнялась по серой карте. Масштабирование осуществлялось по опорной сети, полученной измерениями лазерным дальномером, ориентация обеспечивалась использованием ортофотоплана, полученного с применением БПЛА. Затруднения при съемке были связаны с ограниченностью доступа к нижней части камня, окруженного другими валунами. Поверхность, покрытая мхом, снималась с пониженной детальностью.

Собранные фотоснимки подвергались цветокоррекции, конвертировались из формата камеры в формат JPG и поступали в фотограмметрическую обработку, которая, в целом, выполнялась по стандартной процедуре – но с рядом существенных отличий, обусловленных размерами и геометрией камня и расположением рисунков на нем.

Площадь поверхность камня 65, доступная для наблюдения и документирования на момент съемки, составляла 9,357 м^2 (площадь определена по модели прямым измерением площади сформированных полигонов). Расчет показывает, что для обеспечения минимально допустимой детальности модели при плотности 2 000 полигонов на 1 см^2. необходимо создать модель, состоящую из 187 млн полигонов. На современном этапе развития вычислительного оборудования такая модель технически может быть сформирована, однако дальнейшая работа с ней крайне затруднена. Однако, если привести модель камня 65 к 70 млн полигонов, то ее детальность составит приблизительно 750 полигонов на 1 см^2, что недостаточно для исследования рельефа поверхности.

На камне 65 площадь бугристой поверхности без петроглифов составляет около 8,427 м^2, а сглаженной поверхности с петроглифами – около 0,930 м^2, или порядка 10 % поверхности камня в целом, что предопределило избрание третьего варианта обработки. Соответственно для поверхности с петроглифами была сформирована высокодетальная модель в 32,2 млн полигонов (3 463 полигона на 1 см^2), пригодная для анализа, а для остальной поверхности – модель пониженной детальности в 19,3 млн полигонов (или 232 полигона на 1 см^2), достаточная для воспроизведения геометрии камня в целом. Эти модели были объединены в единую модель, состоящую из 51,8 млн полигонов, а шов между ними обработан так, чтобы он не выделялся на модели (рис. 3).

Дальнейшая пост-фотограмметрическая обработка заключалась в обрезке модели (удалялась преимущественно окружающая камень растительность, фрагменты поверхностей земли и других камней) и удалении ошибок

фотограмметрического алгоритма («шума», «самопересечений»), заполнении мелких отверстий. На каждом этапе пост-фотограмметрической обработки выполнялся контроль качества другим оператором. Конечным результатом цикла обработки стала текстурированная трехмерная полигональная модель видимой части камня 65 (рис. 4).

Интерпретация модели

На настоящем этапе развития программного обеспечения для работы с трехмерными моделями исследователю доступно два основных способа работы с моделями: изучение собственно трехмерной полигональной модели (ТПМ) и изучение карты высот относительно условной поверхности, полученной из фрагмента ТПМ.

Первичная интерпретация выполняется непосредственно по ТПМ. Модель по-фрагментно просматривается в динамическом режиме с применением искусственного затенения под малыми углами к поверхности модели, причем для каждого фрагмента искусственное затенение применяется «полным кругом» и, зачастую, по несколько раз, под разными углами к поверхности (рис. 5). Если при таком просмотре выявляются признаки неестественной «правильности» элементов поверхности (линеаменты, дуги, окружности, которые могут сложиться в какое-то изображение), то участок изучается дольше и тщательнее. Выявленные перспективные участки помечаются непосредственно на модели (рис. 6) и сопоставляются с имеющимися прорисовками и фотографиями. Залогом успеха здесь является детальность, тщательность, последовательность просмотра всей поверхности модели, так как автоматизированных методов, заменяющих человека на этой операции до настоящего времени не разработано.

Применительно к камню 65 первый этап интерпретации оказался относительно простым. Трехмерная полигональная модель была просмотрена по описанному выше алгоритму и сопоставлена с опубликованными прорисовкам [6, с. 210, 211 (табл. 74, 2; 75, 1, 2)] и фотографиям разных лет, сделанными при разном освещении. Сравнение показало, что новых изображений в пределах исследованной поверхности не выявляется, но уже известные изображения (лось и личина) заметно отличаются от сделанных ранее прорисовок и содержат детали, которые на прорисовках не отображены (рис. 7).

Второй этап интерпретации заключается в работе с картой высот (также DEM, от Digital Elevation Model), построенной из фрагмента ТПМ относительно условно выбранной референсной (базовой) плоскости. Карта высот может формироваться как в виде триангуляционной модели, в которой каждый узел имеет три координаты, так и в виде матричной модели с постоянно заданным шагом сетке, каждому из узлов которой присвоено значение высоты относительно референсной плоскости. Главным преимуществом карты высот является возможность применения к ней алгоритмов математической визуализации, присваивающих

каждой точке модели определенный цвет – например по относительной высоте, углу наклона поверхности, экспозиции поверхности относительно осей X и Y прямоугольной системы координат. Для улучшения дешифрируемости поверхности алгоритмы визуализации могут тонко настраиваться, а сама модель преобразовываться – например, путем присвоения повышающего коэффициента к вертикальному масштабу; к модели применяются искусственные затенения (рис. 8). Возможно и применение более сложных преобразований, например, формирование «локальных моделей рельефа» (также LRM, от Local Relief Model) [8; 9]. Ограничением карты высот, следующим из принципа ее формирования, является принципиальная невозможность присвоения одному узлу двух значений высоты. Тем не менее, это полноценная трехмерная модель и именовать ее «2,5D-моделью» математически некорректно.

При работе с картой высот критически важно верно определить положение референсной (базовой) плоскости, обеспечивающее высокую контрастность изображения, динамически формируемого алгоритмом визуализации. В общем случае она должна быть субпараллельна исследуемой поверхности и находиться на небольшом расстоянии «ниже» этой поверхности. Если изображение наблюдается на плоской поверхности, например, на т. н. зеркале скольжения, эта задача не представляет трудности. Однако на валунах Сикачи-Аляна петроглифы редко встречаются на плоских поверхностях, поэтому положение референсной плоскости подбирается опытным путем, в несколько итераций. Как правило, необходимо построение карты высот не только для всего участка поверхности, содержащего изображения, но и для отдельных рисунков и даже отдельных, как правило плохо сохранившихся частей.

Камень 65 в этом отношении можно считать относительно простым. Расположение петроглифов на относительно ровной и плоской поверхности позволило ограничиться определением трех плоскостей и трех соответствующих карт высот – для поверхности в целом, для головы лося и для личины (рис. 9). Результатом стало существенное увеличение контрастности сформированного изображения (рис. 10).

При выявлении и уточнении границ изображений по карте высот в любом случае первоначально на поверхности тестируются все доступные алгоритмы визуализации (по относительной высоте, углу наклона, экспозиции и др.) и выбирается наиболее эффективный алгоритм. Остальные алгоритмы применяются в дальнейшем только для наиболее сложных участков. Применительно к камню 65 наилучшие результаты принесло использование визуализации по относительной высоте (в т. ч. с повышенной цветовой контрастностью) с динамическим режимом расчета диапазона высот и одновременным динамическим затенением. Применение алгоритмов визуализации поверхности по углу наклона и по экспозиции в целом оказалось менее эффективным, но в некоторых случаях позволило существенно уточнить особенности геометрии поверхности (рис. 11).

Как первый (по полигональной модели), так и второй (по

карте высот) этапы интерпретации рельефа поверхности являются итерационными процессами, предполагающими неоднократное возвращение к уже изученным участками и, по крайней мере в большинстве случаев, ведутся одновременно с фиксацией результата, т. е. с прорисовкой наскального изображения.

Прорисовка

Векторизация (прорисовка) петроглифов, выбитых на плоских скальных поверхностях, по трехмерным моделям технологически проста и не слишком отличается от прорисовки по фотографии или сканированной микалентной копии. На сложных поверхностях двойной кривизны этот способ практически неприменим, т. к. при прорисовке существенно искажается геометрия петроглифа. Барельефные петроглифы Сикачи-Аляна как правило расположены именно на таких поверхностях – и это предопределяет переход к трехмерной векторизации, оптимизированной для таких изображений.

Изображение лося на камне 65 является характерным примером ситуации, когда вследствие сложной геометрии поверхности общий контур изображения хорошо виден при искусственном затенении с ориентацией освещения с направления 0°, но рога проявляются только при освещении с направления 90°.

Трехмерная векторизация выполняется непосредственно по полигональной модели с параллельной интерпретацией поверхности по карте высот. Прорисовка изображений ведется поэтапно, с учетом специфики петроглифов Амуро-Уссурийской провинции наскального искусства оптимальной представляется следующая последовательность векторизации:

Определение и прорисовка контура участка с петроглифами. Таким участком представляется фрагмент поверхности камня или скального выхода, ограниченный естественными границами (как правило трещинами, сколами, углами, перегибами поверхности и т. п.). Вся дальнейшая интерпретация и прорисовка ведется в пределах этого контура, причем прорисовываются все изображения и естественные элементы. Контур векторизуется замкнутым сплайном (рис. 12).

Прорисовка естественных элементов поверхности. Под естественными элементами понимаются трещины, жильные образования, контакты горных пород, границы каверн и иных полостей (как заполненных, так и не заполненных), выбоины и сколы поверхности, существовавшие до нанесения на них наскального изображения. Цель этого этапа заключается в выявлении естественных элементов до прорисовки собственно изображения, с тем, чтобы на раннем этапе выявить свойства «холста», использованные художником. При прорисовке естественных элементов допускается игнорирование мелких образований и элементов, непосредственно с изображением не взаимодействующих. Векторизация выполняется замкнутыми и незамкнутыми сплайнами (рис. 13).

Прорисовка наложенных элементов. Наложенные элементы –

это современные посетительские надписи, трещины, сколы и отслоения, появившиеся после выбивки петроглифа. Особенно важна прорисовка наложенных элементов, непосредственно воздействующих на наскальное изображение. В некоторых случаях к прорисовке наложенных элементов приходится возвращаться уже при работе непосредственно с петроглифом. Векторизация выполняется замкнутыми сплайнами.

Прорисовка осей изображения. Первые опыты прорисовки барельефных изображений Сикачи-Аляна показали, что надежно оконтурить границы выбивки (в особенности плохо сохранившейся) на трехмерной модели можно лишь после того, как будет достигнуто понимание общей логики изображения. Поэтому в методику векторизации был включен вспомогательный этап схематичной прорисовки «осей изображения», то есть линий тальвегов – наиболее низких точек выбивки, образующих «каркас» петроглифа. Определение осей изображения выполняется по карте высот, ее растровому изображению или распечатке, допускается использование любого удобного способа рисования (рис. 14).

Прорисовка контура изображения. Под контуром изображения понимается линия, отделяющая измененную человеком поверхность от естественной поверхности камня. Для барельефного изображения положение этой линии достаточно условно, т. к. изображения часто создавались с использованием естественной геометрии поверхности камня, а края их пришлифовывались. Для уменьшения субъективности определения границ выбивки применяется профилирование (рис. 15). Векторизация контура изображения выполняется непосредственно по трехмерной модели замкнутыми сплайнами с интервалом между узлами в 5–10 мм в масштабе 1:1.

Детализация контура изображения. На этапе детализации первично отрисованная линия проецируется на модель, а затем в ней увеличивается число узлов таким образом, чтобы интервал между ними составлял 2–3 мм – в зависимости от кривизны края выбивки и степени сохранности скальной поверхности. Положение этих узлов корректируется вручную. Затем выполняется еще одно сгущение узлов линии (до интервала в 1 мм) и линия вновь переукладывается на модель. Контур считается корректно уложенным, если полученная линия не «проваливается под модель» и не «взлетает над моделью» (рис. 16).

Прорисовка контуров иных элементов наскального изображения. Дополнительно к достоверно дешифрированным контурам выбивок в прорисовке могут отображаться утраченные и предположительные элементы петроглифа, а также формы естественной поверхности, предположительно составлявшие часть композиции наскального изображения (рис. 17). Векторизация таких элементов выполняется сплайнами в отдельных слоях.

На всех этапах векторизация ведется послойно, то есть однородные элементы прорисовываются в соответствующих слоях. В дальнейшем результаты прорисовки могут демонстрироваться

как независимо, так и наложенными на карту высот или трехмерную модель.

Выводы

Применение методики документирования и анализа геометрии поверхности с использованием алгоритмов математической визуализации на камне 65 Сикачи-Аляна позволило существенно уточнить контуры изображения лося и личины и скорректировать их прорисовку. Сформированный набор графических материалов достоверно воспроизводит эти наскальные изображения и по свой точности и детальности превосходит прорисовки, выполненные по эстампажам. Методика позволила, в частности, выявить и визуализировать анатомическую точность изображения на камне головы лося, особенно рогов, свидетельствующих о принадлежности животного к амурскому подвиду (именуемого также лосем уссурийским, *Alces alces cameloides*) (рис. 18–19). Уточнение контуров изображения личины (рис. 20) позволяет указывает на сходство этого изображения с личиной на камне 55 Сикачи-Аляна.

Успешные результаты применения методики на петроглифах камня 65 позволили распространить ее на другие камни и поверхности с барельефными петроглифами Амуро-Уссурийской провинции наскального искусства. К настоящему времени на памятниках Сикачи-Алян, Шереметьево, Кия документировано 76 валунов и участков скал с петроглифами, в переделах которых к настоящему времени идентифицировано 15 не выявлявшихся ранее изображений.

Средствами трехмерного моделирования точно воспроизведена геометрия поверхностей сложной формы. Для анализа морфологии поверхности и улучшения «читаемости» рисунков применены математические алгоритмы визуализации рельефа, позволившие дешифрировать контуры искусственно измененных участков поверхности камня. Это дало возможность существенно уточнить контуры известных петроглифов и выявить новые, ранее не введенные в научный оборот изображения.

Благодарности

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам Лаборатории RSSDA А.С. Пешкову, С.В. Пешкову, Е.С. Конаковой, Р.Г. Габдулину, А.Д. Клейменову, Д.Ю. Анисимовой, В. Красноруцкому, Н.Н. Чекуновой, Е.В. Юшину, М.Ю. Свойскому, выполнившим полевое документирование и трехмерное моделирование камней.

Список использованных источников и литературы

1. Вавулин М.В. Технологии трехмерной оцифровки крупных автономных археологических объектов // Вестник Томского государственного университета. 2016. № 407. С. 55–60.

2. Дэвлет Е.Г., Ласкин А.Р. Петроглифы Хабаровского края: результаты мониторинга последствий паводка в 2013 году на Амуре и Уссури // Археология, этнография и антропология Евразии. 2015. Т. 43. № 4. С. 94–105.

3. Дэвлет Е.Г., Ласкин А.Р. Состояние сохранности петроглифов Сикачи-Аляна: природное и антропогенное воздействие // Археология CIRCUM-PACIFIC: Памяти Игоря Яковлевича Шевкомуда / Под ред. С.В. Батаршева, А.М. Шиповалова. Владивосток, 2017. С. 252–265.

4. Дэвлет Е.Г., Ласкин А.Р., Свойский Ю.М., Романенко Е.В. Документирование ландшафтного контекста и изобразительных особенностей дальневосточных памятников наскального искусства // Труды V (XXI) Всероссийского археологического съезда в Барнауле–Белокурихе: сборник научных статей / Отв. ред. А.П. Деревянко, А.А. Тишкин. Барнаул, 2017. Т. III. С. 93–100.

5. Ласкин А.Р., Дэвлет Е.Г. Петроглифы Амуро-Уссурийского региона: новые открытия и статистические данные // Труды V (XXI) Всероссийского археологического съезда в Барнауле–Белокурихе: сборник научных статей / Отв. ред. А.П. Деревянко, А.А. Тишкин. Барнаул, 2017. Т. III. С. 116–121.

6. Окладников А.П. Петроглифы Нижнего Амура. Л., 1971.

7. Devlet E., Svoyski Y., Romanenko E., Peshkov A., Peshkov S., Pakhunov A., Konakova E., Timofeeva A., Yushin E., Gabdulin R., Kleymenov A., Laskin A. Three-dimensional polygonal modeling of boulders with petroglyphs for understanding of the function of the Sikachi-Alyan rock art site (Russia) // Building Bridges. Abstract book of the 23rd Annual Meeting of the European Association of Archaeologists in Maastricht, 30 August – 3 September 2017., Maastricht, 2017. P. 9.

8. Hesse Ralf. Extraction of archaeological features from high-resolution LIDAR data. 14th International Congress «Cultural Heritage and New Technologies». Vienna, 2009.

9. Vavulin M.V. Documentation of the Old Turkic Runic Inscriptions of The Altai Mountains Using Photogrammetric Technology // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII–2/W8, 2017. 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 28–29 November 2017, Hamburg, Germany.

APPLICATION OF SURFACE VISUALIZATION ALGORITHMS IN THE ROCK ART STUDIES

E.G. Devlet[1], A.R. Laskin[1, 2], A.S. Pakhunov[1], E.V. Romanenko[3], Yu.M. Svoyski[3]

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Project No. 17-29-04389

Introduction

Over the past quarter century, the digital documentation of petroglyphs, including three-dimensional modeling has become part of the daily practice of rock art scholars.

Improving the techniques of documentation, «three-dimensionality» as a way of presenting the material, the possibility of 3D printing and demonstration of results on the Internet often becomes

[1] Institute of Archeology of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
[2] Center for the Preservation of Monuments of history and culture of the Khabarovski Krai (Khabarovsk, Russia).
[3] RSSDA Laboratory (Moscow, Russia).

9. Vavulin M.V. Documentation of the Old Turkic Runic Insights of the Altai Mountains Using Photogrammetric Technology // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII–2 / W8, 2017. 5th International Workshop LowCost 3D – Sensors, Algorithms, Applications, 28–29 November 2017, Hamburg, Germany.

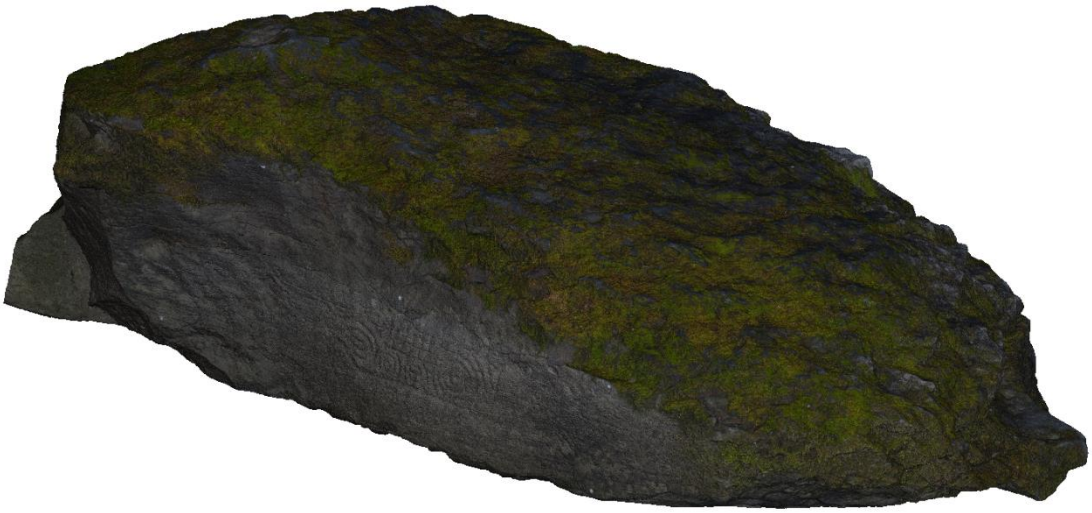

Рис. 1. Камень 65, Сикачи-Алян.
Текстурированная трехмерная полигональная модель

Fig. 1. Stone 65, Sikachi-Alyan. Textured three-dimensional polygonal model

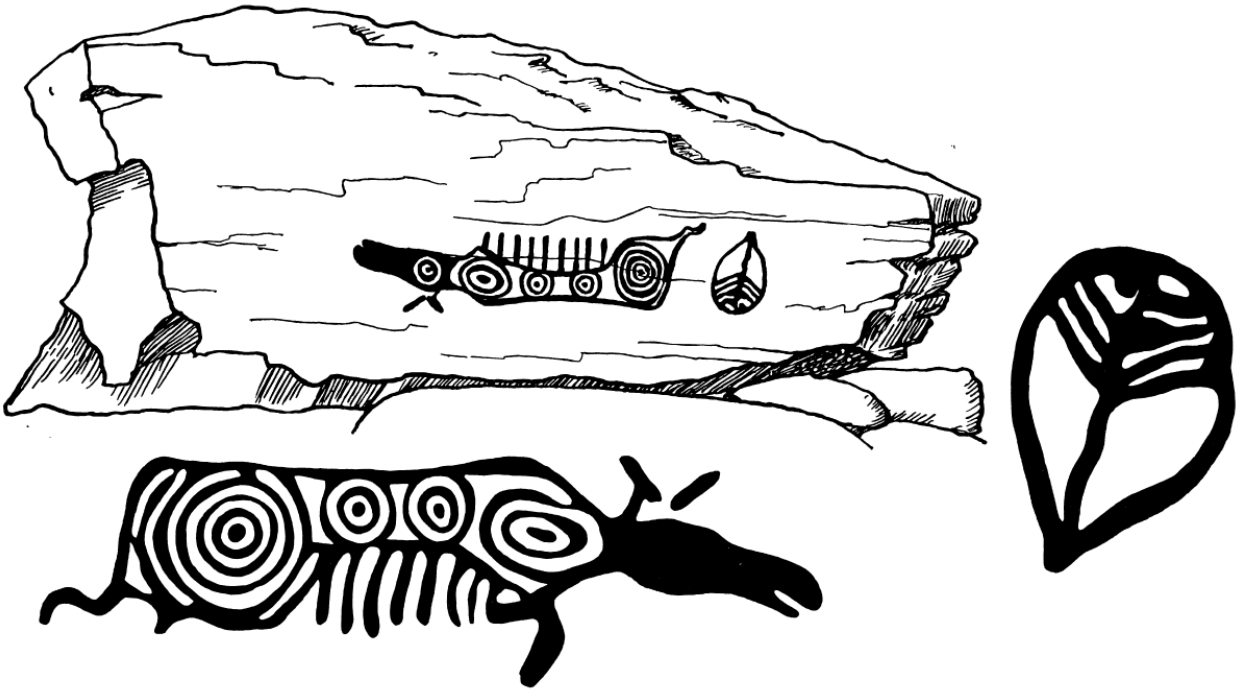

Рис. 2. Прорисовки петроглифов камня 65
(по: 6, с. 210, 211, табл. 74, 2; 75, 1, 2)

Fig. 2. Drawings of petroglyphs of Stone 65
(after: 6, p. 210, 211, tables 74, 2, 75, 1, 2)

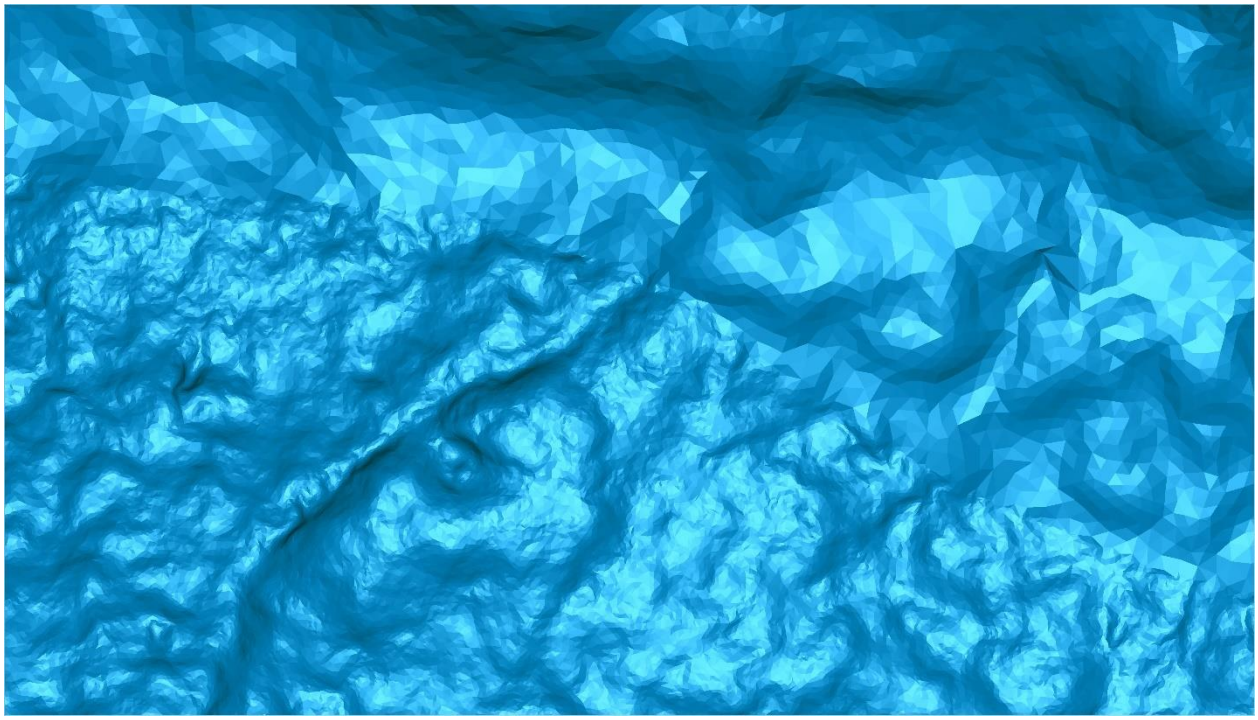

Рис. 3. «Шов» на границе моделей высокой и пониженной детальности

Fig. 3. «Seam» on the border of models of high and low resolution

Рис. 4. Камень 65, Сикачи-Алян. Трехмерная полигональная модель

Fig. 4. Stone 65, Sikachi-Alyan. Three-dimensional polygonal model

Рис. 5. Фрагмент трехмерной полигональной модели в искусственном освещении с разных направлений, примененном под небольшим углом к поверхности

Fig. 5. Part of a three-dimensional polygonal model in artificial lighting from different directions, applied at a small angle to the surface

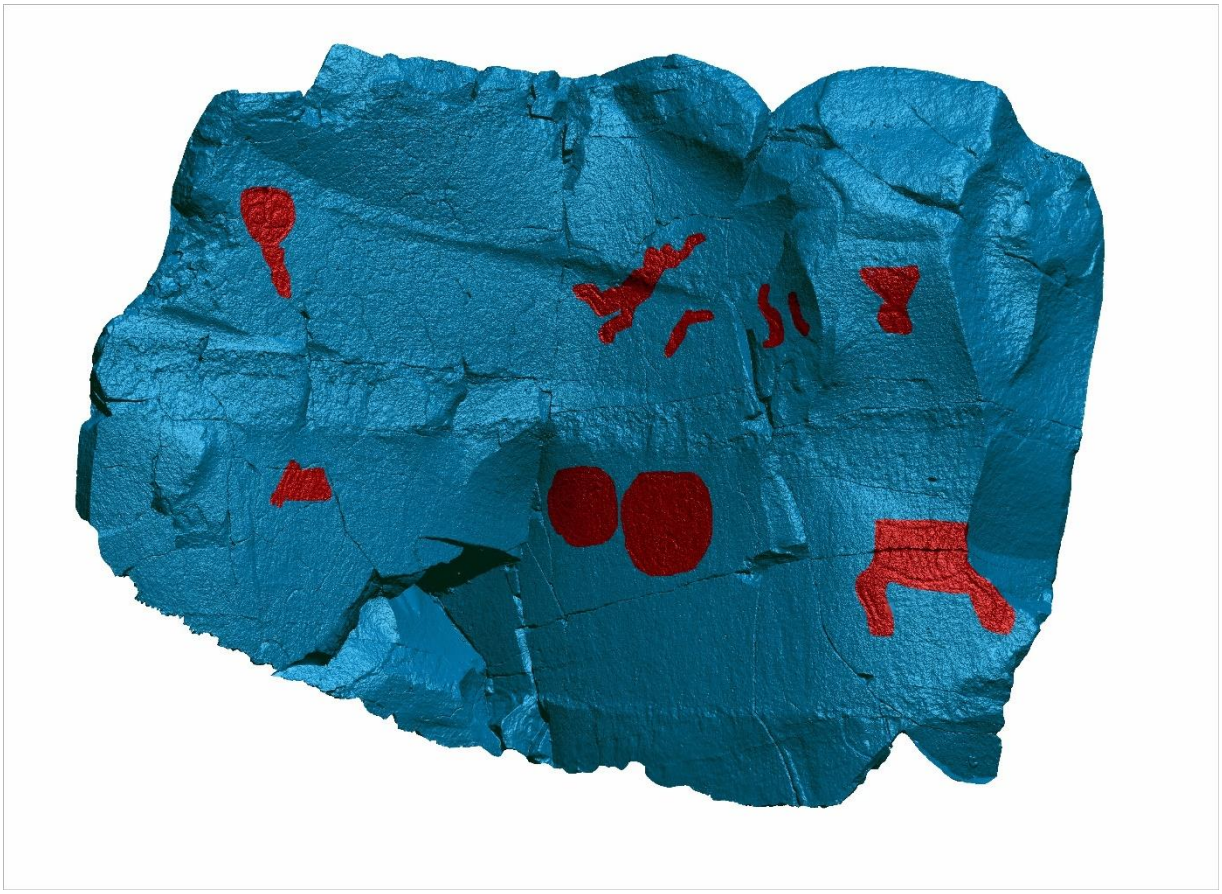

Рис. 6. Пример результатов первичной интерпретации модели с выделенными фрагментами с петроглифами. Киинские петроглифы

Fig. 6. An example of the results of a primary interpretation of a model with highlighted zones with petroglyphs. The Kiia petroglyphs

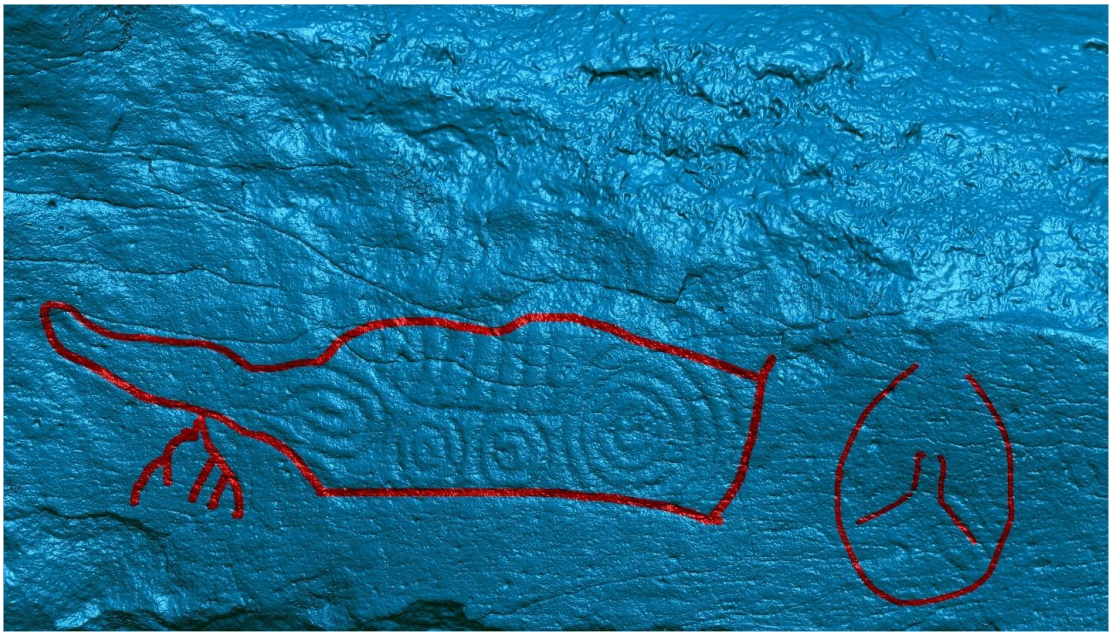

Рис. 7. Предварительно оконтуренные изображения на камне 65, Сикачи-Алян. Трехмерная полигональная модель

Fig. 7. Pre-contoured images on stone 65, Sikachi-Alyan. Three-dimensional polygonal model

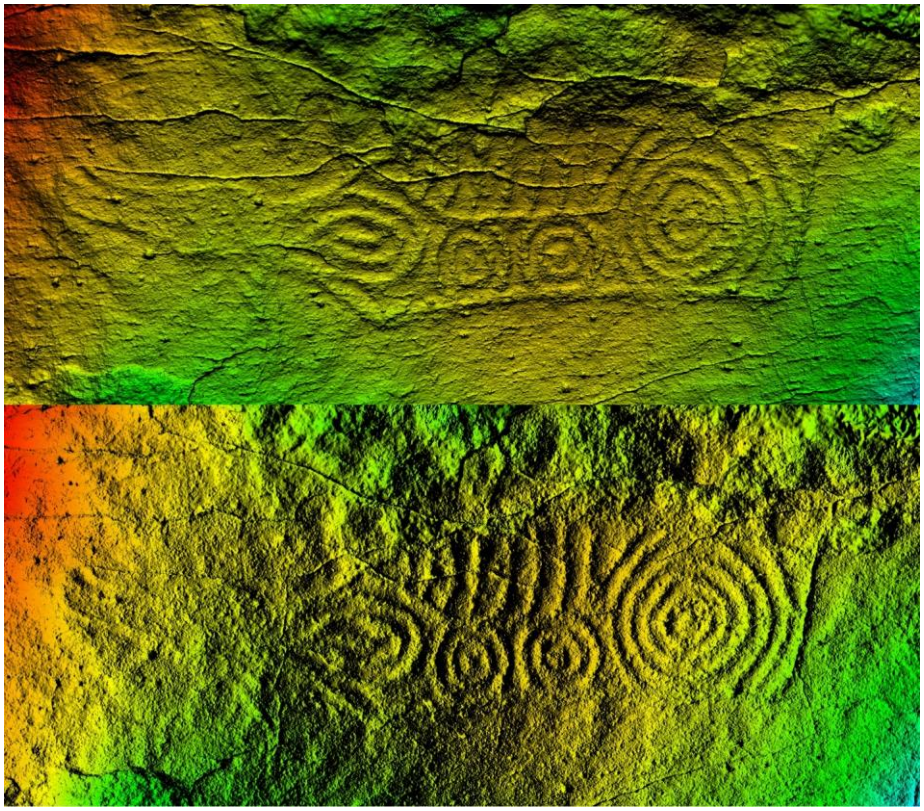

Рис 8. Камень 65, Сикачи-Алян. Фрагмент карты высот с изображением лося, визуализированный по относительной высоте поверхности, с примененным искусственным затенением с разных направлений

Fig. 8. Stone 65, Sikachi-Alyan. A fragment of a height map depicting an moose, visualized by the relative height of the surface, with artificial shading applied from different directions

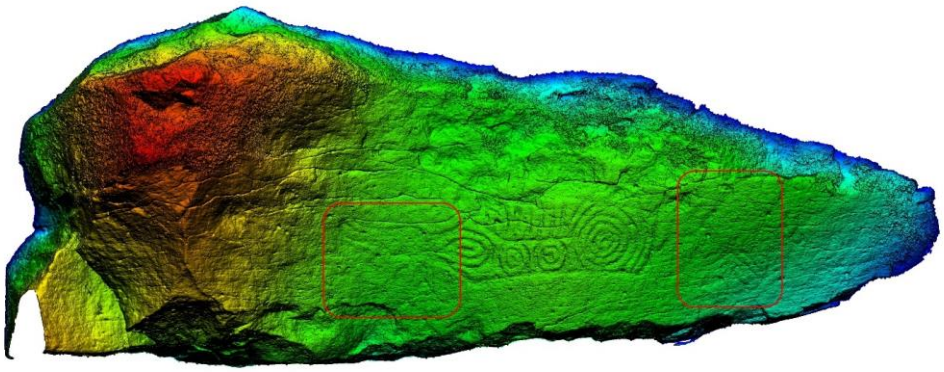

Рис. 9. Камень 65, Сикачи-Алян. Карта высот, визуализированная по относительной высоте поверхности. Обозначены участки, для которых формировались дополнительные карты высот: фрагмент с головой лося и фрагмент с личиной

Fig. 9. Stone 65, Sikachi-Alyan. The height map, visualized by the relative height of the surface. Areas for which additional height maps have been formed are identified: a fragment with an moose head and a fragment with a mask-face

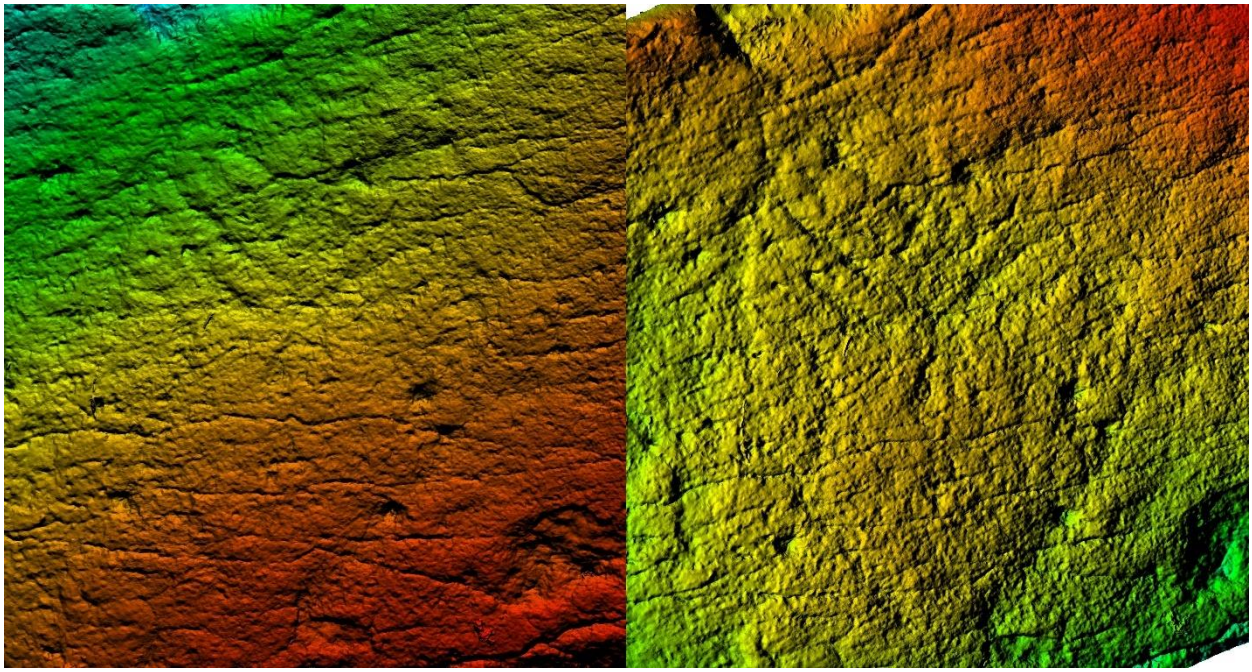

Рис. 10. Камень 65, Сикачи-Алян. Фрагмент с личиной. Сопоставление карт высот, сформированных для всей поверхности с петроглифами (слева) и непосредственно для личины (справа)

Fig. 10. Stone 65, Sikachi-Alyan. Fragment with a mask-face. Comparison of height maps formed for the entire surface with petroglyphs (left) and directly for the face (right)

Рис. 11. Камень 65, Сикачи-Алян. Фрагмент головы лося. Карта высот, визуализированная по экспозиции поверхности

Fig. 11. Stone 65, Sikachi-Alyan. Fragment of the moose head. A height map visualized by slope direction

Рис. 12. Камень 65, Сикачи-Алян. Контур поверхности, подлежащей интерпретации и прорисовке

Fig. 12. Stone 65, Sikachi-Alyan. The contour of the surface to be studied and traced

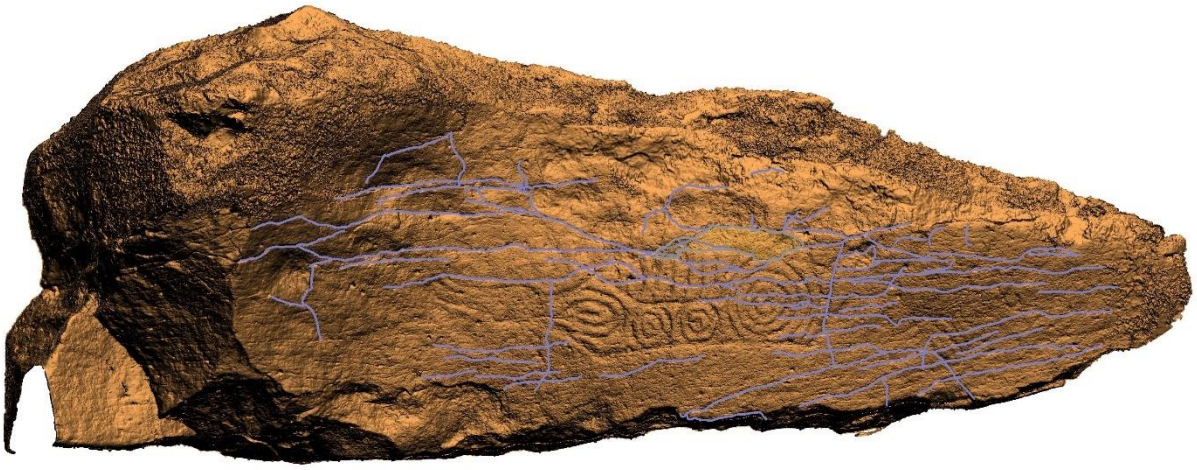

Рис. 13. Камень 65, Сикачи-Алян. Прорисовка естественных элементов

Fig. 13. Stone 65, Sikachi-Alyan. Tracing of natural features

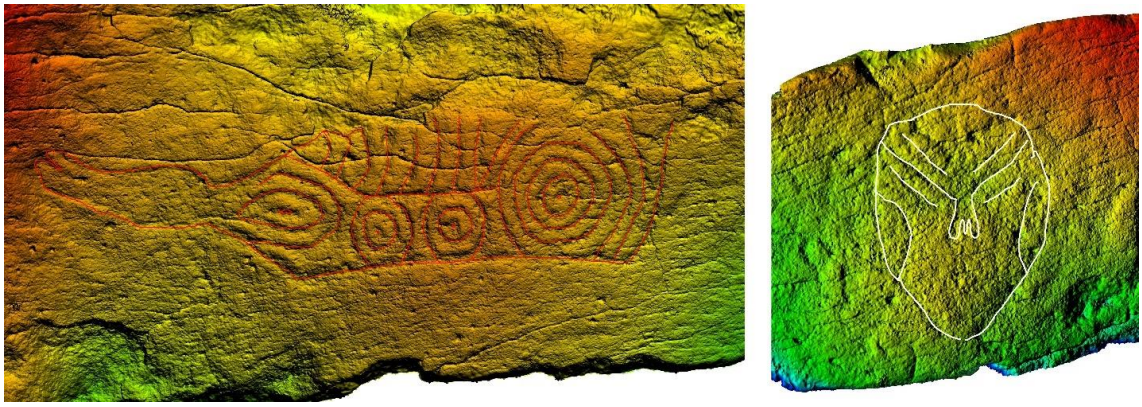

Рис. 14. Камень 65, Сикачи-Алян. Прорисовка осей изображений лося и личины по карте высот

Fig. 14. Stone 65, Sikachi-Alyan. Drawing of axes of images of an moose and a mask-face over height map

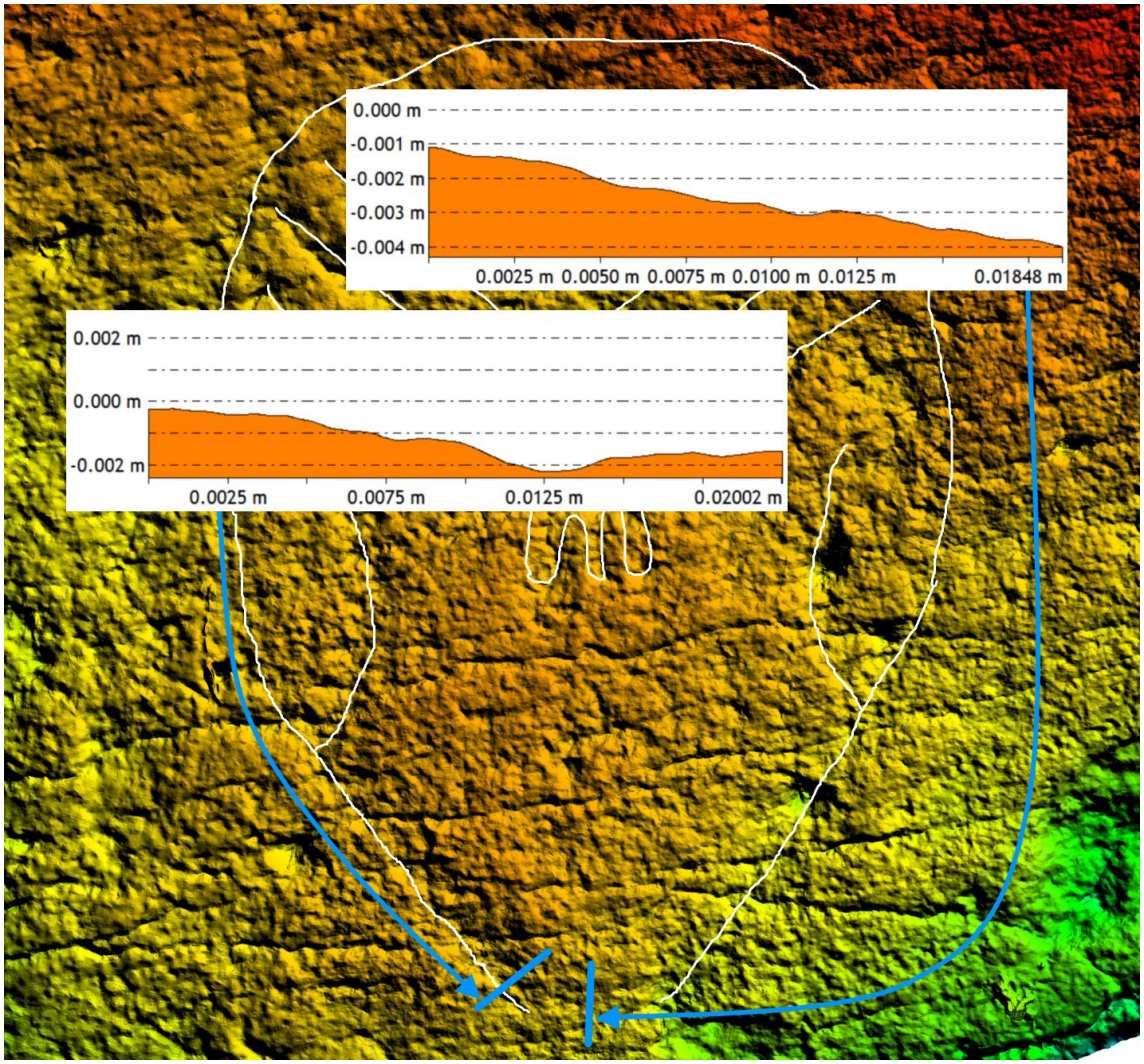

Рис. 15. Применение профилирования для восстановления геометрии предполагаемой естественной поверхности камня и определения положения контура изображения

Fig. 15. Applications of profiling for restoring of the geometry of the supposed natural surface and for determining of the position of the rock carving outline

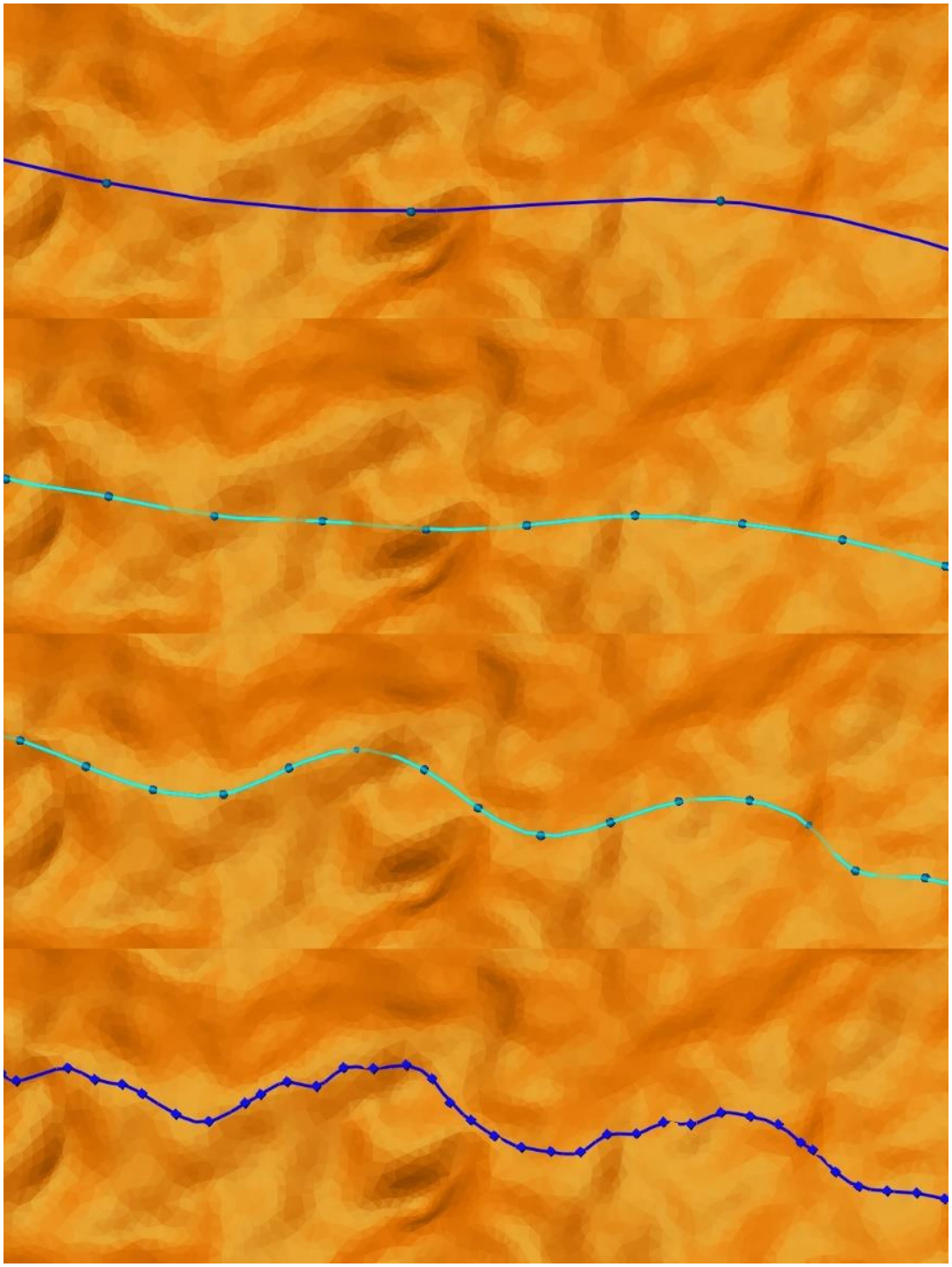

Рис. 16. Эволюция контура выбивки в процессе прорисовки барельефного наскального изображения, сверху вниз: первично прорисованный сплайн с интервалом между узлами 5–10 мм; сплайн спроецирован на полигональную модель, интервалы между узлами сокращены до 2–3 мм; выполнена коррекция положения узлов сплайна; интервалы между узлами сокращены до 1 мм, сплайн спроецирован на полигональную модель и подготовлен к экспорту

Fig. 16. Evolution of the rock carving outline during the tracing of a bas-relief rock image, from top to bottom: a primary traced spline with an interval between nodes of 5–10 mm; the spline is projected onto a polygonal model, the intervals between nodes reduced to 2–3 mm; position of the spline nodes is corrected; the intervals between nodes are reduced to 1 mm, the spline is projected onto a polygonal model and prepared for export

Рис. 17. Предполагаемое использование естественной поверхности как элемента наскального изображения

Fig. 17. The supposed use of a natural surface feature as an element of a rock art

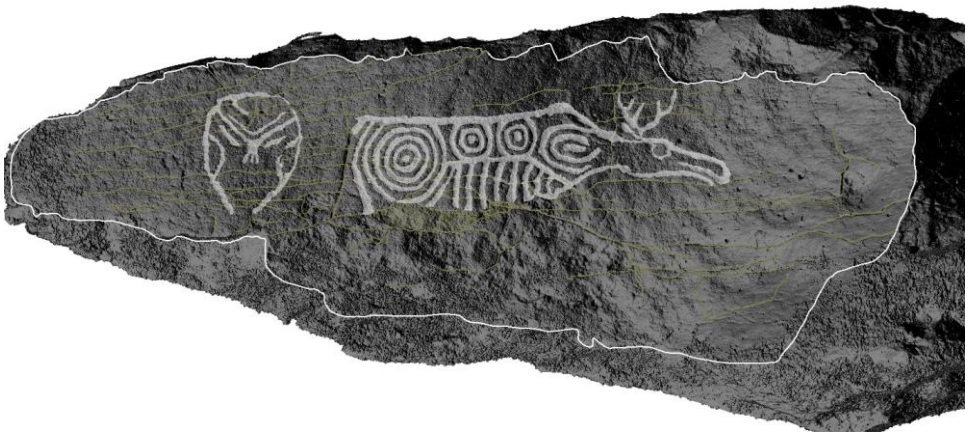

Рис. 18. Камень 65, Сикачи-Алян. Общая композиция

Fig. 18. Stone 65, Sikachi-Alyan. General composition

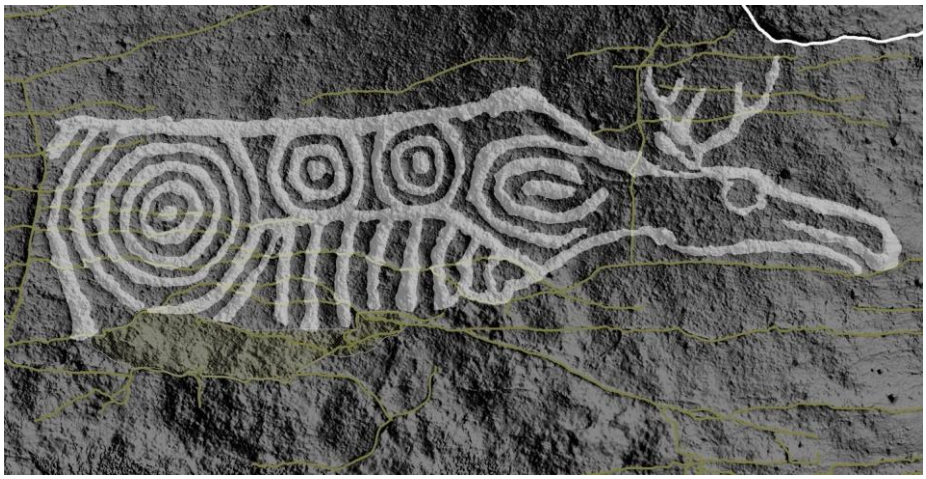

Рис. 19. Камень 65, Сикачи-Алян. Изображение лося

Fig. 19. Stone 65, Sikachi-Alyan. Picture of a moose

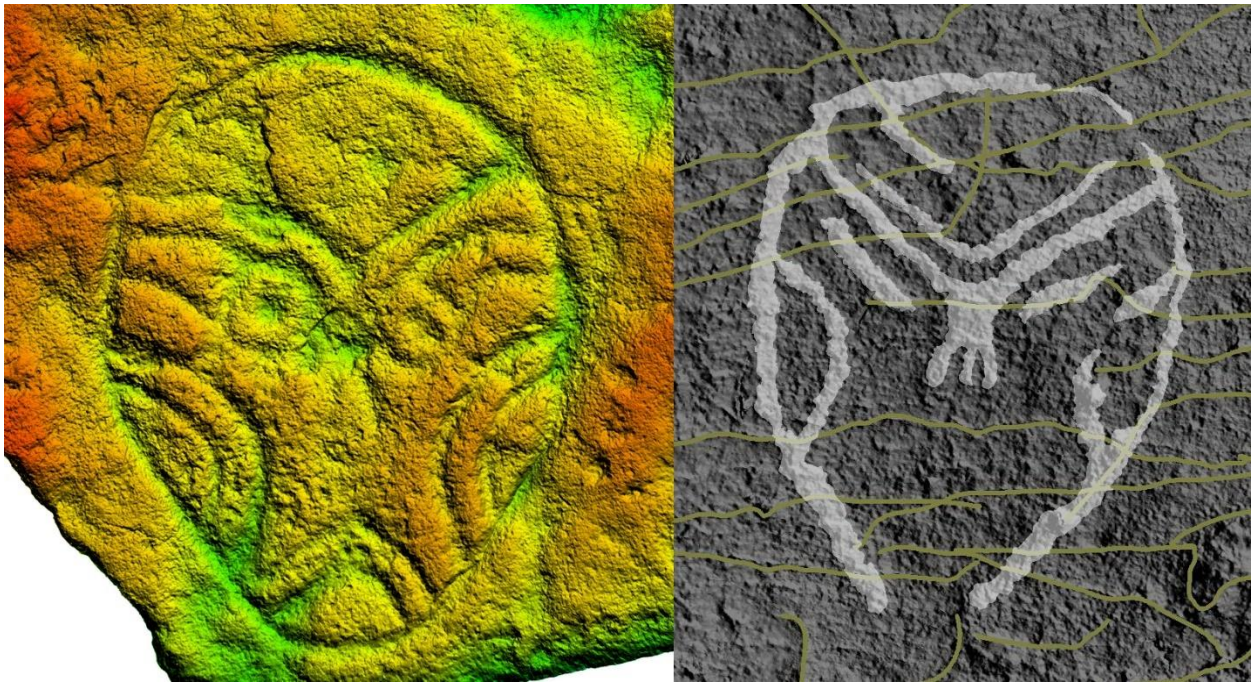

Рис. 20. Личина на камне 65 и ее аналог на камне 55 (слева), Сикачи-Алян

Fig. 20. Mask-face on stone 65 and its analogue on stone 55 (left), Sikachi-Alyan

АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАХОДКИ НА УРОВНЕ СОВРЕМЕННОГО ПОЛА ЗАЛОВ КАПОВОЙ ПЕЩЕРЫ И ВОПРОСЫ МУЗЕЕФИКАЦИИ

В.С. Житенев[1]

Капова пещера (Шульган-Таш) находится в Бурзянском районе Республики Башкортостан, на правом берегу р. Белая, на территории государственного природного заповедника «Шульган-Таш». Пещера представляет собой многоуровневую карстовую полость. В 1959 г. А.В. Рюмин выявил здесь настенные изображения палеолитического возраста. Первые археологические исследования в 1960–1978 гг. проводил О.Н. Бадер [1]. В 1982–1991 гг. комплексное изучение Каповой пещеры возглавлял В.Е. Щелинский [9]. С начала 2000-х гг. на памятнике в разные годы работали экспедиции под руководством Т.И. Щербаковой и В.Г. Котова [8; 10; 11]. С 2008 г. и по настоящее время исследования проводит Южно-Уральская археологическая экспедиция МГУ [5]. На сегодняшний день в пещере известны настенные изображения (фигуры мамонтов, лошадей, носорога, бизона, рыбы, зооантропоморфа, геометрические знаки и многочисленные неидентифицируемые пятна и линии) в залах среднего и верхнего ярусов [3; 6].

Время посещения Каповой пещеры в верхнепалеолитический период определяется в интервале некалиброванных дат от 16010±100 (KN–5023) до 13930±300 л. н. (ГИН–4853) [7]. Калиброванные результаты

[1] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия).

Содержание

Table Of Contents

РЕПРОДУКЦИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРЕДМЕТОВ *(Ален Далис)* 4

LA REPRODUCTION DES OBJETS ARCHÉOLOGIQUES *(Alain Dalis)* 9

ОТ ПЕЩЕРЫ ШОВЕ ДО ПЕЩЕРЫ ПОН Д'АРК *(Давид Юге)* 24

DE LA GROTTE CHAUVET À LA CAVERNE DU PONT D'ARC *(David Huguet)* 20

МУЗЕЕФИКАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ ПЕЩЕР КАК ОБЪЕКТОВ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ: АКТУАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ И СОВРЕМЕННЫЙ ОПЫТ *(Е.В. Бубнель, М.В. Гаухман)*..... 35

MUSEUMIFICATION AND RECONSTRUCTION OF CAVES AS OBJECTS OF HISTORICAL AND CULTURAL HERITAGE: ACTUAL MODELS AND MODERN EXPERIENCE *(E.V. Bubnel, M.V. Gauhman)*..... 31

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА СКАЛАХ *(Е.Г. Дэвлет, А.Р. Ласкин, А.С. Пахунов, Е.В. Романенко, Ю.М. Свойский)* 43

APPLICATION OF SURFACE VISUALIZATION ALGORITHMS IN THE ROCK ART STUDIES *(E.G. Devlet, A.R. Laskin, A.S. Pakhunov, E.V. Romanenko, Yu.M. Svoyski)* . 52

АРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ НАХОДКИ НА УРОВНЕ СОВРЕМЕННОГО ПОЛА ЗАЛОВ КАПОВОЙ ПЕЩЕРЫ И ВОПРОСЫ МУЗЕЕФИКАЦИИ *(В.С. Житенев)*..... 71

ARCHAEOLOGICAL FINDINGS AT THE LEVEL OF MODERN FLOOR OF THE SHULGAN-TASH CAVE AND ISSUES OF MUSEUFICATION *(V.S. Zhitenev)*..... 75

ИТОГИ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ СТОЯНКИ В КУПОЛЬНОМ ЗАЛЕ ПЕЩЕРЫ ШУЛЬГАН-ТАШ (КАПОВОЙ) *(В.Г. Котов)*..... 82

RESULTS OF STUDYING THE MULTILAYERED SITE IN THE DOMED HALL OF THE SHULGAN-TASH (KAPOVA) CAVE *(V.G. Kotov)* 100

СОХРАННОСТЬ ПАЛЕОЛИТИЧЕСКОЙ ЖИВОПИСИ ПЕЩЕРЫ ШУЛЬГАН-ТАШ *(Ю.С. Ляхницкий)*..... 125

PRESERVATION OF THE PALAEOLITHIC PAINTING OF THE SHULGAN-TASH CAVE *(Yu.S. Lyakhnitsky)*..... 132

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦВЕТОВОГО АТЛАСА NCS ДЛЯ СОСТАВЛЕНИЯ ПАЛИТРЫ ПЕЩЕРЫ ШУЛЬГАН-ТАШ (КАПОВОЙ) *(А.С. Пахунов)*..... 145

THE USE OF THE NCS COLOR PALETTE TO COMPOSE THE PALETTE OF THE SHULGAN-TASH (KAPOVA) CAVE *(A.S. Pakhunov)*..... 148

МУЗЕЕФИКАЦИЯ КАК РЕШЕНИЕ КОМПЛЕКСА ПРОБЛЕМ ОХРАНЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОРИКО-КУЛЬТУРНОГО И ПРИРОДНОГО НАСЛЕДИЯ *(Н.И. Решетников)*..... 152

MUSEIFICATION AS A SOLUTION TO A COMPLEX OF PROBLEMS OF PROTECTION AND USE OF HISTORICAL AND CULTURAL AND NATURAL HERITAGE *(N.I. Reshetnikov)* 167

МИКРОБИАЛИТЫ ПЕЩЕРЫ ШУЛЬГАН-ТАШ *(О.Я. Червяцова, Л.Ю. Кузьмина, С.С. Потапов, Л.В. Леонова)* 181

MICROBIALITES OF THE SHULGAN-TASH CAVE *(O.Ya. Chervyatsova, L.Yu. Kuzmina, S.S. Potapov, L.V. Leonova)* 184

Список сокращений / List of Abbreviations 190

Содержание / Table Of Contents 200