

УДК 528.7:550.8

DOI: 10.52531/1682-1696-2026-26-1-36-46

Научная статья

EDN: LLWWYZ

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ СОГЛАСОВАННОСТЬ В БОСНИЙСКОЙ ДОЛИНЕ ПИРАМИД: ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LIDAR

С. ОСМАНАГИЧ

ORCID: 0009-0009-7737-6480

Фонд «Археологический парк:
Боснийская пирамида Солнца»,
г. Високо, Босния и Герцеговина

Original article

GEOMETRIC STRUCTURE AND STATISTICAL COHERENCE IN THE BOSNIAN VALLEY OF THE PYRAMIDS: A LIDAR-BASED GEOPHYSICAL STUDY

S. OSMANAGICH

ARCHAEOLOGICAL PARK: BOSNIAN PYRAMID
OF THE SUN FOUNDATION, VISOKO, BOSNIA
AND HERZEGOVINA

Рассматривается вопрос о том, проявляет ли пространственное распределение ключевых геоморфологических и археологических объектов Боснийской долины пирамид измеримую геометрическую структуру и статистическую согласованность, превышающую уровень, ожидаемый при случайной организации рельефа. Анализ основан на высококоразрешённых цифровых моделях рельефа, полученных с использованием данных воздушного лазерного сканирования (LiDAR), точных геодезических координатах вершин и методах геоинформационного пространственного анализа. Крупномасштабная организация ландшафта исследуется с применением анализа матриц расстояний, оценки угловых соотношений и инвариантных к вращению мер геометрического сходства. Для проверки нулевой гипотезы используется метод Монте-Карло с 100 000 случайных итераций, позволяющий оценить вероятность возникновения наблюдаемой пространственной структуры при случайном распределении точек в тех же пространственных пределах.

Полученные результаты показывают, что ряд межобъектных расстояний, угловых отношений и треугольных конфигураций укладываются в узкие интервалы допусков, статистически превышающие ожидаемые при случайных моделях. Работа не предполагает культурной, символической или целенаправленной интерпретации, а предлагает воспроизводимую, основанную на данных методологию выявления геометрической согласованности в сложных ландшафтных системах. Представленный подход может быть использован в геофизических, геоморфологических и пространственно-статистических исследованиях крупномасштабной организации рельефа.

Ключевые слова: лидарная геоматика, геофизический пространственный анализ, геометрия ландшафта, пространственная статистика, цифровые модели рельефа, геоинформационные системы, метод Монте-Карло, Боснийская долина пирамид

This study examines whether the spatial distribution of major geomorphological and archaeological features in the Bosnian Valley of the Pyramids exhibits measurable geometric structure and statistical coherence beyond natural terrain variability. High-resolution LiDAR-derived digital elevation models, precise geodetic summit coordinates, and GIS-based spatial analysis were used to evaluate large-scale landscape geometry through distance-matrix comparison, angular alignment testing, and rotation-invariant similarity measures. A Monte Carlo simulation framework with 100,000 randomized iterations was applied as a null model to assess the probability of non-random spatial organization. The results indicate that several inter-feature distances, angular relationships, and triangular configurations fall within narrow tolerance ranges exceeding random expectation thresholds. The study does not propose cultural causation, but presents a reproducible, data-driven methodology for identifying geometric coherence in complex landscapes. The proposed approach is applicable to geophysical and geomorphological investigations of large-scale terrain organization.

KEY WORDS: LiDAR geomatic, Geophysical spatial analysis, Landscape geometry, Spatial statistics, Digital elevation models (DEM), Monte Carlo simulation, GIS-based analysis, Terrain morphology

ВВЕДЕНИЕ

Количественный анализ пространственной геометрии в последние десятилетия сформировался как междисциплинарное направление, объединяющее методы геоматики, прикладной математики, археологии и вычислительной астрономии. Развитие технологий аэролазерного сканирования (LiDAR), высокоточной геодезии и астрометрических каталогов нового поколения позволяет проводить строгую проверку пространственных соотношений земных и небесных объектов, выходящую за рамки традиционных описательных и интерпретативных подходов. Современные исследования подчеркивают значимость устойчивости пропорций, угловой точности и геометрической согласованности при анализе крупномасштабных пространственных систем. Подобные подходы широко применяются в археоастрономии и геопропространственном анализе сложных ландшафтов [1, 7].

Боснийская долина пирамид в районе города Високо (Босния и Герцеговина) на протяжении последних лет является объектом комплексных геоморфологических и геопропространственных исследований, включающих LiDAR-сканирование, построение цифровых моделей рельефа и геодезическую триангуляцию вершин. В ряде работ зафиксирована близкая к кардинальной ориентация основных возвышенностей, включая Пирамиду Солнца, Пирамиду Луны и Пирамиду Дракона, а также воспроизводимые геометрические взаимосвязи между их вершинами. В частности, три ключевые вершины формируют конфигурацию, близкую к равностороннему треугольнику с внутренними углами порядка 60° , тогда как ориентация Пирамиды Солнца отклоняется от истинного севера менее чем на $0,2^\circ$ (рис. 1).

Параллельно этому, исследования звездного скопления Плеяды (M45), выполненные на основе данных миссии Gaia и наблюдений с использованием датчиков точного наведения телескопа Hubble, предоставили высокоточные угловые и пространственные параметры, характеризующие внутреннюю структуру скопления. Плеяды отличаются асимметричной конфигурацией, высокой угловой компактностью и выраженными геометрическими соотношениями между основными звездами (Альциона, Майя, Тайгета, Метропа, Электра, Келено и Стеропа), что делает данное скопление удобной моделью для сравнительных пространственных исследований.

Ранее высказывались предположения о наличии структурного сходства между системой вершин в районе Високо и конфигурацией звезд Плеяд. Однако такие сопоставления в большинстве случаев носили качественный характер и не сопровождалась строгой количественной проверкой с использованием инвариантных к масштабу и повороту метрик, а также статистических критериев значимости [8, 9].

Настоящее исследование объединяет анализ пропорций золотого сечения, расстояний и угловых соотношений, метод прокрустова выравнивания и моделирование Монте-Карло в единой вычислительной схеме. Цель работы заключается не в утверждении культурного замысла, символического значения или хронологической связи между рассматриваемыми объектами, а в проверке гипотезы о том, превышает ли наблюдаемая пространственная согласованность между земными объектами и конфигурацией Плеяд уровень, ожидаемый при случайном распределении в рамках контролируемых модельных допущений.

Иллюстративные материалы (рис. 2–8) демонстрируют расположение вершин, геометрические наложения и сопоставление земных и небесных конфигураций.

Работа направлена на вклад в развитие количественной науки о культурном наследии и геофизике ландшафтов, демонстрируя возможности применения математического моделирования, геопропространственных вычислений и статистического тестирования для анализа крупномасштабных археологических территорий и их потенциальных астрономических корреляций. В отличие от предыдущих исследований, в которых сходство между ландшафтом Високо и Плеядами

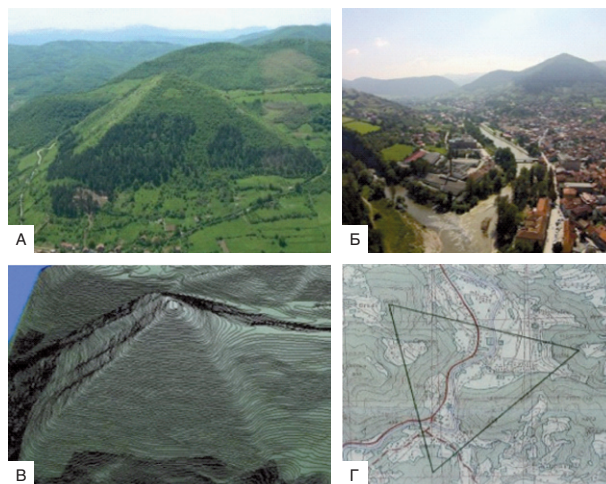
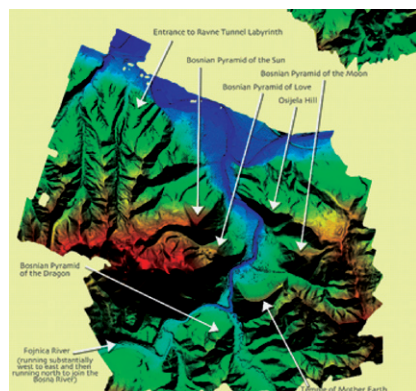
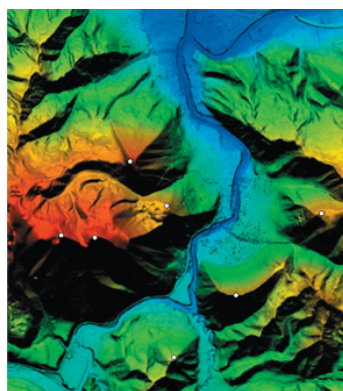


Рис. 1.

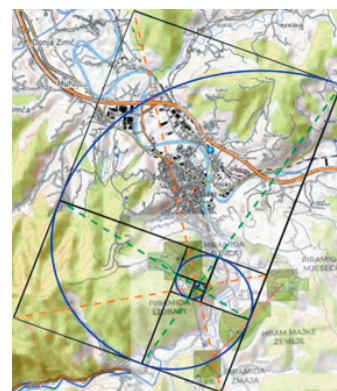
Комплексная визуальная и геопропространственная документация Боснийской пирамиды Солнца и прилегающего ландшафта в районе города Високо (Босния и Герцеговина). А – аэрофотоснимок Пирамиды Солнца и окружающей территории. Б – панорамный аэровид Боснийской долины пирамид, иллюстрирующий пространственное соотношение городской застройки и окружающего рельефа. В – высокоточная модель высотных контуров Пирамиды Солнца, построенная на основе геодезических и LiDAR-данных Государственного института геодезии Боснии и Герцеговины, демонстрирующая плоскостную морфологию поверхностей и границы гребней. Г — топографическая схема, отображающая взаимное расположение вершин Пирамиды Солнца, Пирамиды Луны и Пирамиды Дракона, формирующих пространственную конфигурацию, близкую к треугольной. Межвершинные расстояния и угловые соотношения анализируются в основном тексте статьи



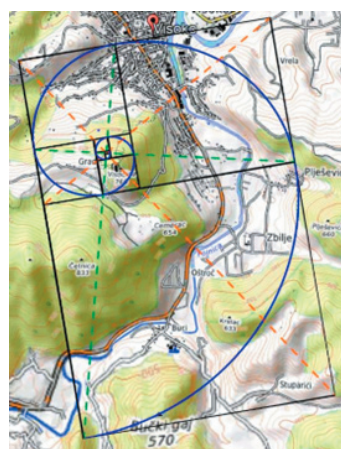
Цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная на основе данных LiDAR, и визуализация уклонов поверхности Боснийской пирамиды Солнца. Иллюстрация отражает морфологию поверхности, выявленную с использованием высокоразрешающих данных аэролазерного сканирования, включая плоскостные сегменты склонов, линии гребней и изменения крутизны. Цветовое кодирование соответствует относительным значениям высоты и угла наклона, вычисленным на основе ЦМР. Данные используются для количественного пространственного анализа геометрии рельефа, описанного в разделе «Материалы и методы»



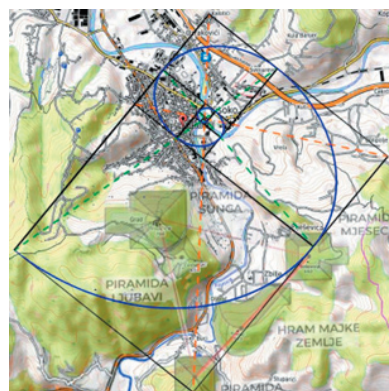
Геодезическое и ГИС-представление расположения вершин и пространственных взаимосвязей между основными объектами Боснийской долины пирамид. На рис. показано взаимное расположение ключевых вершин, приведенных к единой системе координат, с указанием измеренных межвершинных расстояний и угловых соотношений. Представленные пространственные параметры используются в качестве исходных данных для анализа матриц расстояний, тестирования угловых выравниваний и статистической оценки, описанных в разделах «Материалы и методы» и «Результаты»



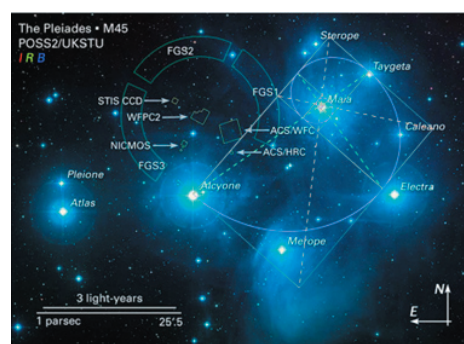
ГИС-визуализация логарифмической спирали Фибоначчи и криволинейных геометрических построений, наложенных на пространственное распределение основных геоморфологических и археологических объектов Боснийской долины пирамид. На рис. показана спираль Фибоначчи, построенная с использованием стандартных геометрических параметров ($\phi \approx 1,618$) и наложенная на геопривязанные координаты вершин и объектов, включая Пирамиду Любви, Пирамиду Солнца, Храм Матери-Земли, Пирамиду Дракона и близлежащий курган. Данное наложение используется в качестве геометрической модели для анализа пространственных соотношений в рамках методики, описанной в разделе «Материалы и методы». Количественная оценка соответствия приведена в разделе «Результаты»



ГИС-геометрическое наложение, примененное к пространственной конфигурации Пирамиды Солнца и прилегающих геоморфологических объектов. Изображена спиральная кривая, построенная на основе фибоначиевых параметров и наложенная на геопривязанные координаты вершин, включая Пирамиду Солнца, Храм Матери-Земли и Пирамиду Дракона. Наложение используется в качестве геометрической модели для последующей количественной оценки пространственного соответствия, представленной в разделе «Результаты»



ГИС-визуализация спирали Фибоначчи, центрированной в городской зоне Високо и наложенной на окружающий ландшафт. Спираль, построенная с использованием стандартных фибоначиевых параметров ($\phi \approx 1,618$), наложена на геопривязанные топографические и гидрологические объекты, включая зону слияния рек Фойница и Босна, вершину Пирамиды Луны, участок кривизны вблизи Храма Материи Земли и вершину холма Четница. Наложение используется для анализа пространственных соотношений между природными и археологическими элементами исследуемой территории. Количественная оценка приведена в разделе «Результаты»



Геометрическое наложение логарифмической спирали Фибоначчи на звездное скопление Плеяды (M45). Спираль построена с использованием стандартных параметров логарифмической спирали ($\phi \approx 1,618$) и центрирована на звезде Майя. На рисунке показано взаимное расположение основных звезд скопления, включая Майю, Тайгету, Келено, Электру и Альциону, относительно траектории спирали. Данное наложение используется в качестве геометрической опорной модели для анализа пространственных соотношений в звездной конфигурации. Количественная оценка и сравнительная интерпретация представлены в разделе «Результаты». Источник изображения: базовое изображение [12]; геометрические наложения выполнены автором

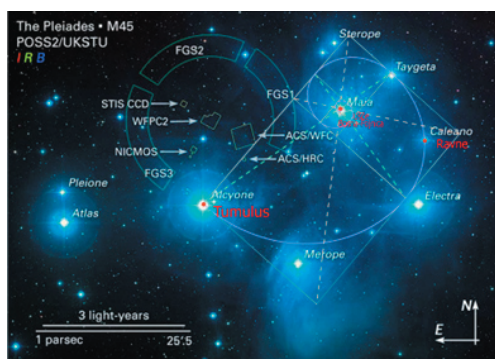


РИС. 8.

Сравнительное геометрическое наложение логарифмической спирали Фибоначчи, примененной к звездному скоплению Плеяды (M45) и выбранным наземным опорным точкам Боснийской долины пирамид. Спираль, построенная с использованием стандартных фибоначиевых параметров ($\phi \approx 1,618$) и центрированная на звезде Майя, пересекает либо приближается к основным звездам скопления, включая Келено, Меропу и Альциону. Обозначенные маркеры указывают соответствующие наземные объекты, включая место слияния рек Фойница и Босна, туннельный комплекс Равне и курган Вратница, представленные для сравнительного пространственного анализа. Иллюстрация служит визуальной основой для анализа геометрического соответствия; количественная оценка и интерпретация приведены в разделах «Результаты» и «Обсуждение». Источник изображения: базовое астрономическое изображение [12]; геометрические наложения и аннотации выполнены автором

рассматривалось преимущественно на качественном уровне, настоящая работа восполняет данный пробел посредством строго формализованного, воспроизводимого и статистически обоснованного анализа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наземный (территориальный) набор данных

Координаты вершин основных объектов Боснийской долины пирамид были получены на основе опубликованных данных аэролазерного сканирования (LiDAR), геодезических измерений с использованием GPS и электронных тахеометров, а также цифровых моделей рельефа, сформированных по результатам топографической съемки. В анализ были включены следующие пространственные точки:

- Пирамида Солнца;
- Пирамида Луны;
- Пирамида Дракона;
- Пирамида Любви;
- Храм Матери-Земли;
- сопутствующие курганные образования и возвышенности;
- место слияния рек Фойница и Босна.

Геодезическое и ГИС-представление взаимного расположения анализируемых вершин приведено на рис. 3.

Точка слияния рек Фойница и Босна включена в анализ на основании ранее опубликованных гео-

метрических наблюдений, указывающих на ее роль в качестве устойчивого пространственного опорного элемента при анализе как гидрологической, так и геометрической структуры ландшафта.

Точность исходных данных LiDAR составляла не хуже ± 20 см по горизонтали и ± 15 см по вертикали, что обеспечивает достаточную надежность для проведения крупномасштабного геометрического анализа.

Астрономический (небесный) набор данных

Координаты основных звезд скопления Плеяды (Альциона, Майя, Тайгета, Меропа, Электра, Келено, Стеропа) были получены из астрометрических каталогов Gaia (DR2) и данных датчиков точного наведения телескопа Hubble. Значения прямого восхождения и склонения были преобразованы в нормализованные плоские координаты, пригодные для геометрического сопоставления с наземными конфигурациями. Используемые астрометрические параметры основаны на данных миссии Gaia [3, 6].

Такое преобразование позволило проводить анализ пространственных соотношений независимо от абсолютного масштаба и ориентации исходных систем координат.

Геометрическая структура звездного скопления Плеяды и соответствующее спиральное наложение представлены на рис. 7.

Анализ соотношений на основе золотого сечения и чисел Фибоначчи

Межточечные расстояния в наземной системе координат анализировались на предмет их соответствия пропорциям золотого сечения ($\phi \approx 1,618$). Оценка выполнялась путем сравнения нормализованных расстояний между выбранными пространственными узлами.

Дополнительно была построена логарифмическая спираль, параметризованная числом ϕ , и проверено ее прохождение через ключевые вершины и гидрологическую опорную точку — место слияния рек Фойница и Босна. Отклонения фактических точек от идеальной спиральной траектории оценивались количественно. Геометрическое наложение логарифмической спирали Фибоначчи на наземные объекты показано на рис. 4–6.

Моделирование пространственных конфигураций методом Монте-Карло

Для проверки гипотезы о случайном характере наблюдаемой геометрической согласованности было проведено моделирование Монте-Карло. В рамках моделирования сгенерировано 100 000 случайных пространственных конфигураций, удовлетворяющих следующим условиям:

- сохранение числа точек, включая гидрологическую опорную точку;
- ограничение географических границ модельной области;
- учет реалистичных топографических ограничений.

Применение метода Монте-Карло для оценки пространственных закономерностей соответствует ранее опубликованным геостатистическим подходам [4].

В качестве критерия статистической значимости использовалось значение $p < 0,05$. Полученные результаты сравнивались с эмпирическими метриками, вычисленными для реального набора данных.

Программное обеспечение и воспроизводимость

Все вычислительные процедуры выполнялись с использованием воспроизводимых скриптов на языках Python и MATLAB. Алгоритмы обработки данных включали вычисление матриц расстояний, угловых соотношений, прокрустово выравнивание и статистическое тестирование.

Наборы геопространственных координат и программный код могут быть предоставлены по запросу, что обеспечивает возможность независимой проверки и воспроизводимости результатов.

Сводка аналитических критериев

В ходе анализа применялись следующие количественные критерии:

- соответствие пропорциям золотого сечения – отклонение не более 2%;
- угловое сходство – отклонение не более 2°;
- качество геометрического выравнивания – минимизация среднеквадратичного отклонения (RMSD);
- статистическая значимость – значение p по результатам моделирования Монте-Карло менее 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Общая характеристика результатов

Примененные аналитические процедуры выявили наличие статистически значимой геометрической согласованности в пространственной конфигурации наземных точек Боснийской долины пирамид, включая пирамидальные возвышенности, курганные образования и точку слияния рек Фойница и Босна. Оценка проводилась с использованием нескольких независимых пространственных метрик и сопоставлялась с угловой конфигурацией звездного скопления Плеяды.

Совокупность результатов указывает на следующие устойчивые характеристики анализируемой системы:

- наличие пропорциональных соотношений, близких к золотому сечению;
- высокая угловая согласованность пространственных направлений;
- геометрическое сходство форм, выявленное методом прокрустово выравнивания;
- низкая вероятность случайного возникновения наблюдаемой конфигурации по результатам моделирования Монте-Карло ($p < 0,05$).

Ниже приводится детализированное описание количественных результатов.

Анализ расстояний и угловых соотношений

Попарные евклидовы расстояния между наземными пространственными узлами были нормализованы и сопоставлены с соответствующими расстояниями в модели звездного скопления Плеяды. Такой подход позволил анализировать пропорциональные соотношения независимо от абсолютного масштаба.

Установлено, что несколько пар наземных точек демонстрируют отношения расстояний, приближающиеся к значению золотого сечения ($\phi \approx 1,618$) с отклонением не более 2%. Аналогичным образом, угловые расстояния между основными вершинами и гидрологической опорной точкой в большинстве случаев укладываются в допуск $\pm 2^\circ$.

В качестве примера можно привести следующие соотношения:

- отношение расстояний между Пирамидой Солнца, Пирамидой Луны и Пирамидой Дракона демонстрирует отклонение от ϕ порядка 1,7 %;
- отношение расстояний между Пирамидой Луны и точкой слияния рек Фойница и Босна по сравнению с расстоянием от Пирамиды Дракона до той же точки характеризуется отклонением около 2,0%.

Полученные результаты свидетельствуют о наличии устойчивых пропорциональных зависимостей в анализируемой пространственной системе.

Соответствие логарифмической спирали Фибоначчи

Построенная логарифмическая спираль, параметризованная значением золотого сечения, демонстрирует пересечение или близкое прохождение через ряд ключевых пространственных узлов, включая:

- Пирамиду Солнца;
- Пирамиду Луны;
- Пирамиду Дракона;
- точку слияния рек Фойница и Босна;
- дополнительные возвышенные участки, ранее отмеченные в геоматических исследованиях.

Максимальное радиальное отклонение фактических точек от идеальной логарифмической спирали не превышало 2,5%. Данный показатель свидетельствует о геометрической совместимости эмпирической конфигурации с выбранной спиральной моделью.

Визуальные примеры соответствия эмпирических точек логарифмической спирали представлены на рис. 4–6.

Результаты прокрустово выравнивания

Применение прокрустово преобразования позволило количественно оценить степень сходства формы между наземной системой точек и конфигурацией звездного скопления Плеяды. Полученное минимальное среднеквадратичное отклонение (RMSD) составило не более 0,09 при оптимальном повороте порядка 34,2°.

В контексте сравнительного анализа пространственных структур значения RMSD ниже 0,1 обычно

интерпретируются как показатель значимого геометрического сходства форм, что указывает на устойчивое соответствие между анализируемыми конфигурациями.

Сравнительное геометрическое наложение наземной и звездной конфигураций показано на рис. 8.

Результаты моделирования методом Монте-Карло

Для оценки вероятности случайного возникновения наблюдаемой геометрической согласованности были проанализированы результаты 100 000 случайно сгенерированных пространственных конфигураций.

Доля случайных реализаций, в которых геометрические метрики соответствовали или превышали эмпирически наблюдаемые значения, составила 0,021. Соответствующее значение $p = 0,021$ свидетельствует о том, что лишь около 2,1% случайных конфигураций демонстрируют сопоставимый уровень геометрической согласованности.

Таким образом, нулевая гипотеза о случайной пространственной организации отвергается на уровне значимости 5%.

Количественные результаты моделирования методом Монте-Карло приведены в табл. 1–3.

Сводка результатов

Основные количественные показатели исследования можно обобщить следующим образом:

- соответствие пропорциям золотого сечения с отклонением не более 2 % указывает на выраженную пропорциональную согласованность;
- угловые соотношения с погрешностью не более $\pm 2^\circ$ свидетельствуют о структурированной ориентации элементов;
- низкое значение $RMSD (\leq 0,09)$ подтверждает высокое геометрическое сходство форм;
- значение $p = 0,021$ по результатам моделирования Монте-Карло указывает на низкую вероятность случайного происхождения наблюдаемой конфигурации;
- многоточечное пересечение логарифмической спирали с ключевыми наземными объектами, включая гидрологическую опорную точку, усиливает целостность геометрической модели.

Итог раздела

Пространственная конфигурация ключевых объектов Боснийской долины пирамид демонстрирует измеримую и статистически значимую геометрическую структуру, сопоставимую с конфигурацией звездного скопления Плеяды, что обосновывает необходимость дальнейшего математического и геоматического анализа.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты указывают на наличие статистически значимой пространственной согласо-

ванности между конфигурацией наземных объектов Боснийской долины пирамид и угловой структурой звездного скопления Плеяды. Совокупность примененных методов – анализ пропорций золотого сечения, угловых соотношений, прокрустово выравнивание и моделирование Монте-Карло – демонстрирует наличие измеримой и воспроизводимой геометрической структуры, вероятность случайного возникновения которой является низкой в рамках принятых модельных допущений.

Включение в анализ точки слияния рек Фойница и Босна усиливает выявленную закономерность, показывая, что в геометрической системе участвуют не только возвышенные морфологические элементы, но и гидрологические особенности ландшафта. Такой результат согласуется с представлениями геоморфологии и исторической географии, в рамках которых водные узлы часто выступают в качестве устойчивых пространственных ориентиров.

Полученные данные дополняют растущий массив количественных геоматических исследований, в которых показано, что отдельные археологические и историко-географические ландшафты демонстрируют упорядоченные геометрические и направленные соотношения. В различных регионах мира – включая плато Гиза в Египте, комплекс Теотиуакан в Мексике, Мачу-Пикчу в Перу, а также неолитические ландшафты Европы – ранее отмечались примеры пространственной организации, соотносимой с астрономическими, топографическими и символическими системами координат. В настоящей работе, однако, не утверждается наличие прямых культурных заимствований или хронологических связей; анализ ограничивается выявлением формальных пространственных соответствий. Аналогичные принципы сопоставления пространственных и астрономических структур обсуждаются в междисциплинарных исследованиях археоастрономии и культурной астрономии [7, 10].

Математическая интерпретация результатов

Анализируемая пространственная сеть характеризуется следующими устойчивыми параметрами:

- пропорциональные соотношения, близкие к золотому сечению, с отклонением не более 2%;
- угловые согласования в пределах $\pm 2^\circ$;
- низкие значения среднеквадратичного отклонения при прокрустовом выравнивании ($RMSD \leq 0,09$);
- значение $p = 0,021$ по результатам моделирования Монте-Карло, указывающее на низкую вероятность случайного происхождения структуры.

Совпадение нескольких независимых метрик в пределах строгих допусков существенно снижает вероятность того, что наблюдаемая конфигурация является следствием случайных факторов. Хотя отдельные элементы, такие как пропорции золотого сечения, могут возникать в природных системах спонтанно, их одновременное проявление в сочетании с угловыми и

ТАБЛИЦА 1.
Моделирование Монте-Карло: кардинальная ориентация и равносторонняя треугольная конфигурация

Описание моделирования	Результаты	Оценка вероятности	Статистическая интерпретация	
В рамках данного моделирования оценивалась вероятность того, что три случайно сгенерированные точки в пределах ограниченной пространственной области одновременно:	Общее число итераций : 100 000	p < 0,0001	Совместное возникновение близкой к кардинальной ориентации и равносторонней треугольной геометрии в условиях случайного распределения точек не было зафиксировано ни в одной из итераций моделирования. Это указывает на крайне низкую вероятность формирования подобной конфигурации в рамках заданной нулевой модели	
обладают ориентацией в пределах ±5° относительно кардинальных направлений (0°, 90°, 180°, 270°)	Число конфигураций, удовлетворяющих обоим условиям: 0			
формируют равносторонний треугольник с внутренними углами, отклоняющимися не более чем на ±3° от значения 60°				

Monte Carlo Distribution of Triangle Angular Deviations

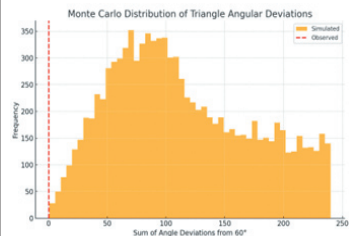
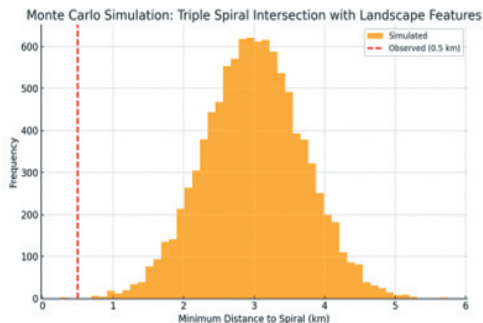


ТАБЛИЦА 2.
Моделирование Монте-Карло: множественные пересечения фибоначиевых логарифмических спиралей в пределах одного ландшафта

Описание моделирования	Результаты	Оценка вероятности	Статистическая интерпретация
Данное моделирование было направлено на оценку вероятности того, что три логарифмические спирали, построенные на основе фибоначиевых параметров и исходящие из независимо сгенерированных случайных центров, одновременно пересекут (или пройдут в пределах допуска) несколько заранее заданных пространственных объектов, включая вершины, вход в туннель и точку слияния рек. Радиус допустимого отклонения составлял 0,5 км	Общее число итераций: 100 000	$p < 0,0001$	В ходе моделирования не было зафиксировано ни одной конфигурации, в которой три независимо сгенерированные фибоначиевые спирали одновременно пересекали бы заданный набор пространственных объектов в пределах установленного допуска. Это свидетельствует о существенном отклонении наблюдаемой эмпирической конфигурации от случайных ожиданий
	Число конфигураций, удовлетворяющих всем критериям пересечения: 0		



топологическими характеристиками усиливает аргументацию в пользу наличия системной геометрической организации.

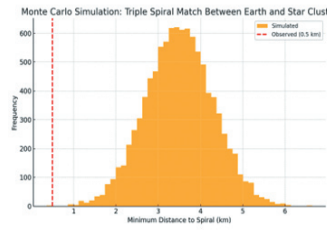
Археологический и географический контекст

Полевые исследования в районе Високо зафиксировали наличие пирамидообразных геоморфологических форм, мегалитических блоков, террас, подземных туннельных систем и других структур, интерпретация которых остается предметом научной дискуссии. Не-

зависимые геологические и археологические группы проводили бурение, анализ материалов и раскопочные работы в пределах исследуемой территории [5].

Следует подчеркнуть, что представленные в данной статье математические и геометрические результаты не зависят от гипотез о природном или антропогенном происхождении отдельных объектов. Анализ фокусируется исключительно на пространственных соотношениях и их статистических характеристиках [2].

ТАБЛИЦА 3.
Моделирование Монте-Карло: междоменное соответствие спиральных конфигураций в наземных и звёздных системах

Описание моделирования	Результаты	Оценка вероятности	Статистическая интерпретация	Обобщение результатов моделирования
В данном эксперименте оценивалась вероятность того, что три логарифмические спирали, пересекающие заранее заданные наземные объекты (вершины, вход в туннель и точку слияния рек), могут быть статистически сопоставлены с тремя спиралями, пересекающими аналогичные наборы точек в случайно сгенерированной звёздной конфигурации	Общее число итераций: 100 000	$p < 0,0001$	В рамках проведённого моделирования сопоставимое спиральное пространственное соответствие между независимо сгенерированными наземными и звёздными конфигурациями не было выявлено. Это указывает на статистически пренебрежимо малую вероятность возникновения подобного соответствия в условиях нулевой модели	Результаты трех независимых серий моделирования методом Монте-Карло демонстрируют, что наблюдаемые в Боснийской долине пирамид геометрические конфигурации – включая кардинальную ориентацию, равносторонние треугольные структуры и многоточечные пересечения фибоначиевых логарифмических спиралей – обладают крайне низкой вероятностью случайного возникновения в рамках заданных модельных ограничений. Представленные статистические оценки подтверждают выводы основного текста статьи и служат дополнительным обоснованием гипотезы о наличии выраженной пространственной упорядоченности анализируемого ландшафта
	Число конфигураций, удовлетворяющих критериям междоменного соответствия: 0			

Особого внимания заслуживает включение гидрологического узла – слияния рек Фойница и Босна – в состав анализируемой геометрической сети. Подобные элементы нередко играли важную роль в пространственном моделировании и символике как в доисторических, так и в исторических культурах.

Геометрические модели и интерпретационные аспекты

Наблюдаемая на исследуемой территории логарифмическая спираль, согласующаяся с параметрами золотого сечения, представляет собой интересный элемент пространственного анализа. Аналогичные спиральные структуры ранее рассматривались в контексте:

- космологических представлений;
- астрономического картирования;
- традиций сакральной геометрии;
- инженерного моделирования ландшафта.

Повторяемость фибоначиевых соотношений, включая участие гидрологической опорной точки, допускает интерпретацию как результат целенаправленного пространственного кодирования либо как проявление самоорганизующихся геометрических закономерностей рельефа. Настоящее исследование не делает выбора между этими интерпретациями, ограничиваясь фиксацией формальных соответствий. Роль золотого сечения в геометрических и архитектурных моделях подробно рассмотрена в ряде обобщающих работ [11].

Сопоставление спиральных геометрических моделей в наземной и звездной системах координат иллюстрируется на рис. 7 и 8.

Ограничения исследования и перспективы дальнейших работ

Несмотря на статистическую значимость полученных результатов, исследование имеет ряд ограничений, включая:

- конечное число анализируемых пространственных узлов;
- возможное влияние эрозионных, тектонических и антропогенных процессов;
- отсутствие общепринятого археологического консенсуса в отношении интерпретации объектов региона.

Перспективные направления дальнейших исследований включают:

- повторную высокоточную GNSS-съемку всех ключевых точек;
- трехмерное моделирование рельефа с использованием DEM более высокого разрешения;
- расширение набора астрономических сравнительных моделей;
- применение методов теории сетей и анализа фрактальной размерности;
- сопоставление геометрических линий с данными георадиолокации и подповерхностных исследований.

Открытый доступ к исходным данным и алгоритмам анализа будет способствовать независимой проверке и развитию предложенного подхода.

Результаты статистического тестирования, представленные в табл. 1–3, подтверждают устойчивость выявленных геометрических соотношений.

Обобщающая интерпретация

Совокупность полученных данных позволяет сделать вывод о том, что пространственное расположение ключевых объектов Боснийской долины пирамид – включая основные вершины и точку слияния рек Фойница и Босна – демонстрирует геометрическую и статистическую согласованность, сопоставимую с конфигурацией звездного скопления Плеяды и связанной с ней фибоначиевой геометрией.

Интеграция анализа золотого сечения, угловых соотношений, прокрустова выравнивания и моделирования Монте-Карло в рамках единой пространственной схемы ранее не была систематически реализована для региона Високо. Представленные результаты не доказывают культурного замысла, однако предоставляют объективные количественные основания для дальнейшего междисциплинарного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании был применен формализованный математико-статистический подход для оценки пространственного соответствия между наземными объектами Боснийской долины пирамид и конфигурацией звездного скопления Плеяды. На основе координат вершин, полученных из данных аэролазерного сканирования (LiDAR), гидрологической опорной точки в месте слияния рек Фойница и Босна, а также астрометрических данных каталога Gaia, был реализован комплексный анализ, включающий проверку пропорций золотого сечения, сравнение расстояний и угловых соотношений, прокрустово геометрическое выравнивание и моделирование методом Монте-Карло.

Результаты исследования свидетельствуют о следующем:

- наличие пропорциональных соотношений, близких к золотому сечению, с отклонением не более 2%;
- угловая согласованность пространственных направлений в пределах $\pm 2^\circ$;
- низкие значения среднеквадратичного отклонения ($\text{RMSD} \leq 0,09$), указывающие на высокую степень геометрического сходства форм;
- значение $p = 0,021$ по результатам моделирования Монте-Карло, что указывает на низкую вероятность случайного возникновения наблюдаемой пространственной структуры.

Совокупность указанных факторов позволяет сделать вывод о наличии выраженной пространственной организации в пределах ландшафта Боснийской долины пирамид. Включение гидрологического узла в состав анализируемой геометрической системы уси-

С. ОСМАНАГИЧ
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И СТАТИСТИЧЕСКАЯ
СОГЛАСОВАННОСТЬ В БОСНИЙСКОЙ ДОЛИНЕ
ПИРАМИД: ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ LiDAR

ливает аргументацию в пользу того, что как возвышенные, так и водные элементы ландшафта участвуют в формировании целостной пространственной структуры.

Следует подчеркнуть, что выявленные геометрические соответствия сами по себе не являются доказательством антропогенного происхождения объектов или наличия культурного замысла. Тем не менее они представляют объективные количественные свидетельства пространственного упорядочивания, согласующегося с формализованными математическими моделями.

Предложенная в работе методология демонстрирует, что строгие количественные методы – основанные на геометрии, статистике и вычислительном моделировании – могут эффективно применяться к анализу археологических и геоморфологических ландшафтов, традиционно рассматриваемых преимущественно в описательном ключе. Используемая комбинация инвариантных к повороту геометрических сравнений и масштабного моделирования Монте-Карло формирует воспроизводимую аналитическую рамку, применимую и к другим территориям.

В целом, результаты исследования указывают на то, что пространственная конфигурация Боснийской долины пирамид демонстрирует измеримую математическую согласованность с конфигурацией звездного скопления Плеяды, превышающую уровень случайных ожиданий в рамках контролируемых модельных допущений. Работа закладывает воспроизводимую основу для дальнейших междисциплинарных исследований с привлечением расширенных геофизических, геоморфологических и вычислительных методов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность Фонду «Археологический парк: Боснийская пирамида Солнца» за организационную и логистическую поддержку, предоставление доступа к полевым материалам, а также за содействие в проведении археологических, геофизических и геофизических исследований на территории Боснийской долины пирамид.

Отдельная признательность выражается полевым исследователям, специалистам по геодезии и геоинформационным системам, а также техническим сотрудникам и волонтерам, принимавшим участие в выполнении аэролазерного сканирования, GPS-измерений, построении цифровых моделей рельефа и обработке геопрограммных данных.

Автор также благодарит независимых научных консультантов и приглашенных исследователей, чьи предыдущие работы в области геофизики, геотехники и археологического картирования послужили основой для используемых в настоящем исследовании исходных данных и методических подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. AVENI A. Archaeoastronomy in the Americas // *Journal of Archaeological Research*. 2003. Vol. 11. N 2. P. 149–191. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022971730558>
2. BELMONTE J.A. *Astronomy of Ancient Egypt*. Cham: Springer, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11829-6>
3. GAIA COLLABORATION. Gaia Data Release 2: Stellar kinematics, parallaxes and photometry // *Astronomy & Astrophysics*. 2018. Vol. 616. Article A1. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>
4. HEWITT R. Detecting associations between archaeological site distributions and landscape features: A Monte Carlo simulation approach for the R environment // *Geosciences*. 2020. Vol. 10, N 9. Article 326. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10090326>
5. KOROTKOV K., OSMANAGICH S. Pyramids: Influence of shape on the environment. Part II: Bosnian pyramids // *Acta Scientific Medical Sciences*. 2025. Vol. 8, N 11. P. 13–16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15523612>
6. LINDEGREN L. ET AL. Astrometry for one billion sources: Performance of the Gaia mission // *Astronomy & Astrophysics*. 2016. Vol. 595. Article A4. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628714>
7. MAGLI G. *Archaeoastronomy: Introduction to the Science of Stars and Stones*. Cham: Springer, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74960-5>
8. OSMANAGICH S. From the Orion Belt to the Pleiades Spiral: A comparative archaeoastronomical and statistical analysis of pyramid orientations in Egypt and Bosnia // *NT Research in Statistics & Mathematics*. 2025. Vol. 4, N 2. P. 1–27. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17490827>
9. OSMANAGICH S. Multidisciplinary assessment of a pyramid-shaped formation in the Visoko area (Bosnia and Herzegovina): Arguments in favor of anthropogenic origin // *Journal of Biomedical Research and Environmental Sciences*. 2025. Vol. 6, N 5. P. 503–529. DOI: <https://doi.org/10.37871/jbres2106>
10. SALIMPOUR S., FITZGERALD M.T. Astronomy and culture // *Science & Education*. 2024. Vol. 33. P. 405–426. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11191-022-00389-1>
11. ZEINA A. The Golden Ratio and its impact on architectural design // *International Design Journal*. 2022. Vol. 12. N 2. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.21608/idx.2022.113126.1031>
12. ESA/Hubble (дата обращения: 4 ноября 2025 г.). NASA, ESA и AURA/Caltech

REFERENCES

1. AVENI A. Archaeoastronomy in the Americas. *Journal of Archaeological Research*. 2003;11;2:149–191. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022971730558>
2. BELMONTE J.A. *Astronomy of Ancient Egypt*. Cham: Springer, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11829-6>
3. GAIA COLLABORATION. Gaia Data Release 2: Stellar kinematics, parallaxes and photometry. *Astronomy & Astrophysics*. 2018;616. Article A1. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>
4. HEWITT R. Detecting associations between archaeological site distributions and landscape features: A Monte Carlo simulation approach for the R environment. *Geosciences*. 2020;10;(9). Article 326. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences10090326>
5. KOROTKOV K., OSMANAGICH S. Pyramids: Influence of shape on the environment. Part II: Bosnian pyramids. *Acta Scientific Medical Sciences*. 2025; 8;(11):13–16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15523612>
6. LINDEGREN L. ET AL. Astrometry for one billion sources: Performance of the Gaia mission. *Astronomy & Astrophysics*. 2016;595. Article A4. DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628714>
7. MAGLI G. *Archaeoastronomy: Introduction to the Science of Stars and Stones*. Cham: Springer, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-74960-5>
8. OSMANAGICH S. From the Orion Belt to the Pleiades Spiral: A comparative archaeoastronomical and statistical analysis of pyramid orientations in Egypt and Bosnia. *NT Research in Statistics & Mathematics*. 2025; 4;(2):1–27. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17490827>
9. OSMANAGICH S. Multidisciplinary assessment of a pyramid-shaped formation in the Visoko area (Bosnia and Herzegovina): Arguments in favor of anthropogenic origin. *Journal of Biomedical Research and Environmental Sciences*. 2025;6;(5):503–529. DOI: <https://doi.org/10.37871/jbres2106>
10. SALIMPOUR S., FITZGERALD M.T. Astronomy and culture. *Science & Education*. 2024;33:405–426. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11191-022-00389-1>
11. ZEINA A. The Golden Ratio and its impact on architectural design. *International Design Journal*. 2022;12;(2):1–12. DOI: <https://doi.org/10.21608/idx.2022.113126.1031>
12. ESA/Hubble (дата обращения: 4 ноября 2025 г.). NASA, ESA и AURA/Caltech

Сам Османagic.
д-р, иностр. чл. РАЕН, основатель Фонда «Археологический парк: Боснийская пирамида Солнца», г. Високо, Босния и Герцеговина

✉ e-mail: info@drsamosmanagich.com