

С.Б. Болелов*, Г.Ю. Колганова**, М.Г. Никифоров***

*Государственный музей искусства народов Востока
Никитский бульвар, 12а, Москва, 119019

**Институт Востоковедения РАН
ул. Рождественка, 12, Москва, 107031

***Московский государственный лингвистический университет
ул. Остоженка, 38, Москва, 119034

E-mail: bsb1958@yandex.ru;
kolganova_gy@mail.ru;
followup@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ АРХИТЕКТУРНЫХ ПАМЯТНИКОВ ХОРЕЗМА

Исследована пространственная ориентация сооружений древнего и средневекового Хорезма. Проведенный анализ обнаруживает два статистически значимых направления: ориентация вдоль линии меридиана и по азимуту восхода Солнца в день зимнего солнцестояния. Показано, что значимость последнего азимута находит отражение в культурной традиции региона.

Ключевые слова: Хорезм, пространственная ориентация, астрономия, культура.

DOI: 10.20874/2071-0437-2019-45-2-085-096

Целью настоящей работы является изучение астрономической ориентации архитектурных памятников Хорезма. Под термином «астрономическая ориентация» мы понимаем ориентацию элементов планировки сооружения на астрономически значимые направления, которым соответствуют стороны света, азимуты восхода и/или захода Солнца в дни солнцестояний и азимуты восхода/захода Луны в крайнем северном и южном положениях.

Изучению пространственной ориентации отдельных памятников посвящено множество работ, однако обобщающих исследований мало. Наибольший интерес представляет выборка М.С. Булатова [1978, с. 21–66], состоящая из 36 сооружений, принадлежащих к различным культурам (Месопотамия, Египет, Греция, Средняя Азия, Индия) и сильно разбросанных во времени, от шумерских храмов IV тыс. до н.э. до индийских памятников раннего средневековья (VII в. н.э.). Проведенный анализ показывает связь архитектуры и астрономии в самых разных культурах, однако не позволяет сделать более определенные выводы по конкретному региону. Кроме того, М.С. Булатов пользовался археологическими планами, составленными третьими лицами, поэтому у нас нет информации ни о точности определения азимутов¹, ни о том, какой из меридианов (магнитный или истинный) обозначен на плане. Следует помнить также, что обнаружение на отдельно взятом памятнике астрономически значимого азимута может быть случайным совпадением. Когда мы имеем несколько десятков памятников со случайной ориентацией, то, с учетом погрешности 2–3 градуса, ориентация хотя бы одного из них с достаточно большой вероятностью будет соответствовать какому-то из астрономически значимых направлений. По-прежнему, что для каждого региона можно отобрать по несколько памятников с некой астрономической ориентацией, а потом объединить их в одно множество. Следовательно, стоит задача обоснования результата, которую можно решить методами статистики. Если некий азимут обнаруживается на однородной² группе памятников многократно, это означает, что такая ориентация является неслучайной.

На вопрос пространственной ориентации обращал внимание С.П. Толстов [1948], упоминая, что сооружение ориентировано стенами или углами по сторонам света. Впрочем, для С.П. Толстова вопрос этот был второстепенным, его оценки являются очень приближенными.

¹ Например, компас может давать ошибку до 5 градусов.

² Под однородностью группы памятников понимается требование, согласно которому все рассматриваемые объекты должны относиться к определенной культуре и принадлежать к конкретному хронологическому периоду.

Исследование ошибок

Проведенный нами анализ точности археологических планов памятников показал, что использовать их для решения задачи определения пространственной ориентации невозможно [Колганова и др., 2014, с. 26–30]. Сравнение разных археологических планов одного и того же памятника друг с другом и со спутниковыми снимками выявило различие ориентации линии меридиана от нескольких до полутора десятков градусов. Причина наблюдаемой картины заключается в отсутствии унификации положения истинного севера. Проверка показала, что на одних планах указан магнитный север, на других приведен истинный, на третьих планах следует предположить ошибку в знаке магнитного склонения, которая, вероятно, появилась при приведении магнитного меридиана к истинному. Это можно утверждать с большой уверенностью, когда значение невязки равно удвоенной величине магнитного склонения. Наконец, в ряде случаев отклонение от истинного севера настолько велико, что его можно объяснить только наличием грубой ошибки неизвестного характера. Непригодность составленных ранее археологических планов для анализа пространственной ориентации сильно ограничивает число объектов, которые можно использовать для статистического анализа.

Во-первых, многие памятники, описанные в работах прошлого века, в настоящее время не существуют. Под поля были раскопаны Якке-Парсанский и Беркут-калинский оазисы, хотя сами Якке-Парсан и Беркут-кала сохранились. При сооружении гидроузлов были затоплены территории, на которых, в частности, находились крепость Капарас и культовый памятник Елхарас. То есть сегодня памятников физически меньше, чем в 50-е и 70-е гг. прошлого века, когда они исследовались.

Поэтому (из-за невозможности проведения новых измерений в полевых условиях) мы воспользовались спутниковыми снимками программы Google Earth (далее — GE), что наряду с очевидным преимуществом приводит к некоторым издержкам. Качество снимков зависит от местности и не всегда позволяет обнаружить памятник на изображении. Например, памятники правобережного Хорезма, расположенные рядом с населенными пунктами и дорогами, сфотографированы с хорошим разрешением. Памятники левобережного Хорезма, находящиеся в пустыне (Калалы-гыр-2, Гяур-кала-3, Дзу-кала и др.), отсняты (на 2015 г.) с низким разрешением. Кроме того, есть сильно разрушенные сооружения, плохо видимые из космоса даже при хорошем разрешении снимка. Оба этих фактора уменьшают количество памятников, которые мы можем использовать для анализа.

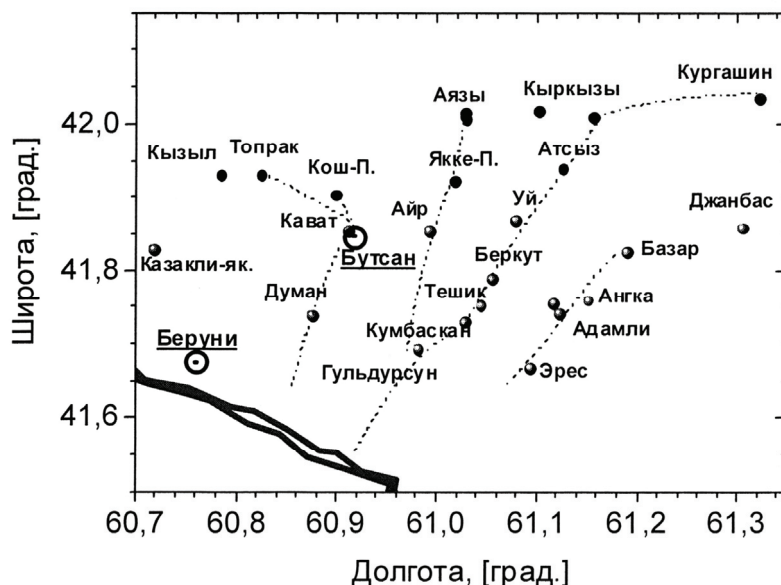


Рис. 1. Карта наиболее крупных сохранившихся памятников.
Fig. 1. Map of the largest preserved monuments.

В результате для исследования пространственной ориентации были отобраны лишь 37 объектов, в чьей основе лежит форма выпуклого многоугольника. К этому множеству мы добавили азимут главной оси Кой-Крылган-калы исходя из предположения, что ее ориентация может быть

Исследование пространственной ориентации архитектурных памятников Хорезма

связана с гелиакальным восходом Плеяд [Колганова и др., 2014; Болелов и др., 2015]. Будем считать, что составленная нами выборочная совокупность отражает свойства генеральной совокупности, которая в настоящее время (в силу упомянутых выше причин) недоступна для исследования. На рис. 1 приведена карта наиболее крупных сохранившихся памятников.

Для каждого памятника необходимо найти набор направлений-азимутов, характеризующих пространственную ориентацию его стен. Под азимутом будем понимать угол, образованный прямой, проходящей через стены памятника, и линией меридиана. Для сооружений прямоугольной формы можно определить четыре азимута, образующих две пары, связанные очевидным соотношением $A_{i+2} = A_i + 180$, $i = 1, 2$. Поэтому для дальнейшего анализа оставим только два из четырех направлений.

При определении азимута в процессе анализа изображения можно выделить два основных источника ошибок. Первая ошибка является общей как для процесса обработки спутникового снимка, так и для измерений, проведенных в полевых условиях. Другая характерна именно для процесса обработки изображения.

Первый тип ошибки связан с самим памятником и обусловлен степенью его сохранности и/или особенностями конструкции. Очевидно, что азимуты на хорошо сохранившемся объекте (Аяз-кала 1, Джанбас-кала) можно определить значительно точнее, чем на частично разрушенном и/или оплывшем (Кульбаскан-кала 1, 2). Также необходимо принять во внимание, что некоторые хорошо сохранившиеся памятники, которые мы ранее отобрали для анализа, имеют особенности планировки. Например, западные и восточные стены Калалы-гыр-1 и северная стена Аяз-калы 3 отклоняются от прямой линии, что может быть связано с приспособлением конструкции стен к особенностям рельефа местности или с ошибками, допущенными при строительстве. Тем не менее если величина максимального отклонения стены от прямой линии мала по отношению к длине стены, то азимут может быть проведен, однако точность его определения будет ниже стандартной.

Вторая ошибка обусловлена качеством обрабатываемого изображения, а точнее, соотношением геометрических размеров памятника L к размерам самых мелких деталей, различимых на изображении l . Пустынные территории, удаленные от крупных городов и инфраструктурных объектов, довольно часто сфотографированы в низком разрешении, когда $l_{пустынь} \gg l_{город}$, поэтому крупные детали на таком космоснимке значительно размыты, а мелкие невидимы вообще. Чем больше соотношение L/l , тем выше точность определения азимута. Наличие этой ошибки приводит к тому, что ориентация компактного памятника с размерами 20–30 м (цитадель Адамли-калы, замок № 2) будет определена с невысокой точностью даже для относительно хороших изображений.

Сюда же следует отнести появление дополнительных погрешностей, связанных с освещением. На двух одинаковых снимках одного и того же памятника, полученных в разное время, положение теней, падающих от его стен, будет различаться. Это может повлиять на определение азимута, особенно при плохой сохранности памятника и невысоком качестве изображения.

Ошибка второго типа можно устранить с помощью измерений в полевых условиях, или она может быть уменьшена в будущем, когда появятся космоснимки соответствующих территорий лучшего качества.

При оценке азимутов необходимо по возможности учесть все характерные типы ошибок, поэтому для каждого азимута мы ввели буквенно-цифровой код, характеризующий его качество (табл. 1).

Искомые азимуты определялись по паре параллельных стен, если эти стены имеют буквенно-цифровой шифр, соответствующий одинаковому качеству оценки азимута, или по одной стене, которая характеризуется шифром лучшего качества. Качество шифров можно упорядочить в следующем порядке: $B1 > B2 > B3 > H1 = H2 = H3 = H4$.

Ранжирование шифров является попыткой дать качественную оценку погрешности, с которой мы находим азимут. Подобное оценивание «на глаз» несколько субъективно, однако оно позволяет уверенно упорядочить азимуты по точности в рамках одного памятника и выбрать из них наилучший для последующего анализа. Правда, для дальнейшей работы необходимо получить количественную оценку погрешности.

Согласно нашим предыдущим расчетам [Колганова и др., 2014, с. 26], использование стандартных инструментов программ Adobe Photoshop позволяет определить по изображению из программы GE угол между линией меридиана и выбранным направлением с погрешностью $\varepsilon \approx 1,7^\circ$ при ширине доверительного интервала на уровне 1σ .

Оценка качества снимка с помощью кода

Table 1

Evaluation of image quality using code

Код	Легенда
B1	Хорошо сохранившаяся стена, позволяющая наиболее точно провести азимут
B2	Стена частично разрушена, но отдельные ее фрагменты позволяют уверенно провести азимут, например по пристенным башням
B3	Остатки стен и качество изображения позволяют определить азимут с удовлетворительной точностью
H1	Остатки стены позволяют определить азимут с низкой точностью
H2	Стена или ее фрагмент имеет малые геометрические размеры, азимут определен с низкой точностью
H3	Стена имеет значительную кривизну или заметно неровная, но азимут можно оценить по отдельным фрагментам или крайним башням с низкой точностью
H4	Плохое качество космоснимка, азимут определен с низкой точностью
X1	Стена сильно оплыла или значительно разрушена, азимут не определен
X2	Стена имеет неправильную форму или другие особенности, азимут не определен
X3	Стена не видна на изображении, азимут не определен

Однако это значение было получено на памятниках разного качества, но теперь, после введения классификации, мы можем уточнить результат. Нашей целью является определение величины погрешности, соответствующей каждому из шифров. Предположим, что стены всех памятников четырехугольной формы строго параллельны³, а отклонение от параллельности азимутов противоположных стен объясняется только описанными выше ошибками 1-го и 2-го типа. Тогда из пар соответствующих азимутов можно составить четыре группы. В первую группу войдут пары азимутов с шифрами «B1»–«B1», во вторую — пары с шифрами «B2»–«B2», в третью — пары с шифрами «B3»–«B3», в четвертую — пары «H»–«H». Приведем в качестве примера азимуты из первой группы (табл. 2).

Таблица 2

Оценка отклонения стен от параллельности

(здесь мы предполагаем, что стены памятника параллельны, а наблюдаемое отклонение вызвано ошибкой обработки изображения)

Table 2

Evaluation of the deviation of walls from parallelism

(here we assume that the walls are strictly parallel, and the deviation from parallelism is our image processing error)

№	Памятник	Пара азимутов		Abs(ΔA)
		A ₁	A ₂	
1	Айр-кала	30	30	0,0
2	Анга-кала	135,5	135,5	0,0
3	Аяз-кала 1	75	76	1,0
4	Вазир-рабат	100	100	0,0
5	Вазир-рабат	2,5	2,0	0,5
6	Джанбас-кала	155	156	1,0
7	Джанбас-кала	64,5	64	0,5
8	Казакли-Яткан	120	120	0,0
9	Калалы-гыр-1	101	105	3,5
10	Кош-Парсан-кала	84,5	84	0,5
11	Кош-Парсан-кала	-4,5	-5,0	0,5
12	Кызыл-кала	141,5	142,5	1,0
13	Кызыл-кала	53	53	0,0
14	Кыргыз-кала Бол.	72,5	72,0	0,5
15	Пиль-кала	90,5	9,0	0,5

Согласно приведенным данным, средняя величина отклонения стен от параллели составляет для первой группы $\delta_1(15) = 0,63 \pm 0,39$. Наибольшая невязка соответствует памятнику Калалы-гыр-1, однако непараллельность его северной и южной стен хорошо видна на фотографии даже невооруженным глазом. То есть в данном случае отклонение стен от параллели в большей степени

³ На самом деле это не так, но мы предполагаем, что угол, характеризующий «непараллельность» стен, значительно меньше допускаемой нами ошибки оценивания. Те случаи, когда это предположение, очевидно, не выполняется, рассмотрим отдельно.

Исследование пространственной ориентации архитектурных памятников Хорезма

определяется не погрешностью наших измерений, а особенностью конструкции. Если исключить из рассмотрения Калалы-гыр-1, получим $\delta_1(14) = 0,42 \pm 0,87$. В оставшихся группах имеем значения средних отклонений: $\delta_2(7) = 0,86 \pm 1,03$, $\delta_3(3) = 1,67 \pm 1,53$, $\delta_4(8) = 2,19 \pm 1,56$. При этом сразу же бросаются в глаза скромный объем второй и четвертой выборки и совсем маленький объем третьей. Из второй группы можно исключить невязку, соответствующую Уй-кале, на том же основании, что и для Калалы-гыр-1. На фотографии видно, что западная стена заметно отклоняется от линии меридиана, которая, в свою очередь, с хорошей точностью проходит по восточной стене. Статистическая гипотеза о равенстве средних отклонений в первой и второй группах не позволяет выявить между ними значимых различий при уровне значимости $\alpha = 0,05$. Причем результат остается устойчивым как при добавлении в выборку Калалы-гыр-1 и Уй-калы, так и без них. Это означает, что из имеющегося объема информации следует, что точность определения азимута в первых двух группах одинакова. Более того, несмотря на различие пар величин $(\delta_1; \delta_3)$, $(\delta_3; \delta_4)$ значимых статистических отличий между средними значениями первой и третьей, а также третьей и четвертой группами выявить нельзя. Это связано с малочисленностью третьей группы, состоящей всего из трех элементов.

Согласно расчетам, существует значимое статистическое отличие между первой и четвертой группами при $\alpha = 0,05$, а между второй и четвертой — при $\alpha = 0,10$. Если наблюдения первой и второй группы объединить в одно множество, получим $\delta_{12}(22) = 0,70 \pm 0,90$, а при исключении Калалы-гыр-1 и Уй-калы, невязки которых значимо отличаются от всех остальных, будем иметь $\delta_{12}(20) = 0,45 \pm 0,39$.

Таким образом, памятникам с шифрами «В1» и «В2» соответствует точность определения азимута из космического снимка чуть менее 1 градуса, однако в качестве оценок мы возьмем именно эту величину. Азимутам с литерой «Н» соответствует точность около 2 градусов. Шифр «В3» находится между двумя данными оценками, и, вероятно, мы не слишком ошибемся, если возьмем усредненное значение.

Было бы очень полезно проверить, насколько реалистична полученная нами оценка. Для этого необходимо сравнить значение азимута, определенного в полевых измерениях, с азимутом, полученным в процессе обработки спутникового изображения. К сожалению, в нашем распоряжении есть единственное надежное наземное измерение, относящееся к памятнику Кой-Крылган-кала [Кой-Крылган-кала..., 1967, с. 23]. Нам точно известно, что измерялся магнитный азимут, и известна поправка магнитного склонения. Хотя точность наземных измерений не указана, даже если геодезисты использовали самый простой теодолит модели «Т-30», погрешность составляет не более 10'. Корректное приведение магнитного азимута к истинному азимуту дает величину направления главной оси сооружения $A = 80^\circ$, что точно совпадает со значением азимута, полученным нами из обработки космоснимка [Болелов и др., 2015, с. 182–183]. Такое совпадение может показаться «абсолютно точным», однако необходимо принять во внимание оценку ошибки для каждой из величин. Можно предположить, что ошибка в наземных измерениях не превышает 10', а мы в своих оценках округляли азимут до 30'. Поэтому можно утверждать, что оба измерения азимута соответствуют друг другу в пределах погрешности, а наши оценки точности являются вполне разумными. Отметим, что азимут Кой-Крылган-калы имеет шифр «В2», которому соответствует высокая точность измерений.

Анализ ориентации памятников Хорезма

Рассмотрим пространственную ориентацию архитектурных сооружений древнего (от IV в. до н.э.) и раннесредневекового (до XI–XII вв. н.э.) Хорезма. Хотя временной период в 1,5 тысячелетия может показаться слишком большим, в качестве начальной гипотезы предположим, что строительные традиции (до определенного времени) не претерпевают значительных изменений. Априори эта гипотеза подтверждается статистически при анализе среднего расстояния между башнями, расположенными по периметру стен [Болелов и др., 2016, с.137–138]. Если же наше предположение ошибочно, это можно будет установить апостериори, после проведения анализа.

Результаты сравнения астрономически значимых направлений с направлениями, которые обнаруживаются на архитектурных памятниках Хорезма, приведены в табл. 3.

В этом расчете мы приняли величину возможной отстройки (отклонения) от точного значения азимута равной $|\Delta A| \leq 3,4^\circ$, что соответствует погрешности определения угла по спутниковому снимку, взятой на уровне 2σ .

Ориентация памятников по астрономически значимым азимутам

Table 3

Grouping of monuments along astronomically significant directions

Ориентация вдоль линии меридиана, $A = 0^\circ$				
Число памятников: $n = 10$. Доля памятников: 25,6 %. $\bar{A} = -0,05^\circ$, $\sigma = 1,47^\circ$				
Название	A	ΔA	Датировка памятника	Оценка снимка
Аяз-кала-3	-2,0	-2,0	IV–III вв. до н.э.	B1
Вазир-рабат	2,25	2,25	IV–II вв. до н.э.	B1
Джанпик (цит.)	0,5	0,5	IX–X вв.	B1
Кават-кала	0,0	0,0	VI–VIII вв.	B3
Кульбаскан-кала-1	0,25	0,25	VI–VIII вв.	H1
Кульбаскан-кала-2	0,25	0,25	VI–VIII вв.	H1
Пиль-кала	0	0	IV в. до н.э.	B1
Уй-кала	1,5	1,5	VI–VIII вв.	B2
Усадьба № 1 ⁴	-2,75	-2,75	IX–XII вв.	H1
Хазарасп	-0,5	-0,5	IV–II вв. до н.э.	B1
Ориентация на равноденственный восток, $A = 90^\circ$				
Число памятников: $n = 6$. Доля памятников: 15,4 %. $\bar{A} = 90,0^\circ$, $\sigma = 0,96^\circ$				
Джанпик (цит.)	91,0	1,0	IX–X вв.	H2
Кават-кала	90,0	0,0	VI–VIII вв.	B3
Пиль-кала	90,25	0,25	IV в. до н.э.	B1
Уй-кала	91,0	0,0	VI–VIII вв.	B1
Усадьба № 1	91,75	1,75	IX–XII вв.	H1
Хазарасп	89,0	-1,0	IV–II вв. до н.э.	B1
Азимут восхода Солнца в день ЗСС, $A = 121,5^\circ$				
Число памятников: $n = 7$. Доля памятников: 17,9 %. $\bar{A} = 120,64^\circ$, $\sigma = 1,97^\circ$				
Айр-кала	122	0,5	V–VII вв.	B1
Б. Гульдурсун	119	-2,5	IV–II вв. до н.э. ⁵	B1
Замок № 2 ⁶	119	-2,5	IV в.	H2
Замок №60 ⁷	120	-1,5	V–VIII вв.	B2
Казакли-Яткан	120	-1,5	IV–III вв. до н.э.	B1
Кандым-кала	120	-1,5	IV–II вв. до н.э.	B2
Тешик-кала	124,5	3,0	VI–VIII вв.	H2
Азимут восхода Солнца в день ЛСС, $A = 57^\circ$. Число памятников: $n = 1$. Доля памятников: 2,6 %				
Кургашин-кала	55	-2,0	IV–II вв. до н.э.	H4
Высокая Луна, северный азимут, $A = 49^\circ$. Число памятников: $n = 1$. Доля памятников: 2,6 %				
Кумбаскан-кала	49	0	VII–VIII вв.	B2
Высокая Луна, южный азимут, $A = 129^\circ$. Число памятников: $n = 0$. Доля памятников: 0 %				
Низкая Луна, северный азимут, $A = 64^\circ$. Число памятников: $n = 1$. Доля памятников: 2,8 %				
Джанбас-кала	64,25	0,25	IV в. до н.э.	B1
Низкая Луна, южный азимут, $A = 114,5^\circ$. Число памятников: $n = 2$. Доля памятников: 5,6 %				
Атсыз-кала	112	-2,5	VI–VIII вв.	B3
Базар-кала	114,5	0	IV–II вв. до н.э.	B1
Азимут гелиакального восхода Плеяд, $A = 78,5^\circ$. Число памятников: $n = 1$. Доля памятников: 2,8 %				
Кой-Крылган-кала	80	1,5	IV–III вв. до н.э.	B2

Примечание: ЛСС и ЗСС — соответственно летнее и зимнее солнцестояние.

В общей сложности 23 из 38 (или 61 %) памятников имеют пространственную ориентацию, соответствующую семи астрономически значимым азимутам. При подсчете количества азимутов мы учли, что ориентация вдоль линии меридиана (астрономический север) тесно коррели-

⁴ Усадьба № 1. Памятник идентифицирован методом триангуляции с помощью программы GE и картой-схемой Б.В. Андрианова [1969, межстранич. вклейка, с. 141–145].

⁵ Стены крепости были перестроены в средние века, однако они расположены на фундаменте античного периода.

⁶ Идентификация С.Б. Болелова, работавшего на этом памятнике.

⁷ Замок № 60. Памятник идентифицирован методом триангуляции с помощью программы GE и картой-схемой Беркут-калинского оазиса из работы Е.Е. Неразик [1966].

Исследование пространственной ориентации архитектурных памятников Хорезма

рована с ориентацией на равноденственный восток. Это объясняется тем, что геометрическая форма подавляющего большинства памятников близка к прямоугольной, поэтому если одна стена визирует астрономический север, то перпендикулярная ей стена будет направлена по линии восток — запад. Согласно табл. 3 мы получили, что 10 памятников ориентированы на астрономический север и 6 — вдоль линии восток — запад. В последнем списке нам «не хватает» четырех азимутов, соответствующих памятникам Аяз-кала-3, Вазир-рабат и Кульбаскан-кала-1 и 2. Их отсутствие объясняется следующим. Стены Кульбаскана-1, расположенные вдоль параллели, не видны на спутниковых снимках, поэтому мы не можем определить, какой азимут они визируют. Формы Вазир-рабата и Кульбаскан-калы-2 немного отличаются от прямоугольной, что, вероятно, связано с погрешностью, допущенной при строительстве. В результате азимуты памятников $A_2(\text{Вазир-Рабат}) = 100^\circ$ и $A_2(\text{Кульбаскан-2}) = 94^\circ$, ориентированные в сторону востока, не попадают в искомый интервал $90^\circ \pm 3,4^\circ$. Наконец, Аяз-кала-3 представляет собой параллелограмм, который не может одновременно визиовать оба азимута. Таким образом, первые два списка дают нам 10 памятников.

Для определения, какие азимуты из табл. 3 являются статистически значимыми, а какие — нет, нам необходимо оценить порог отсечки, т.е. найти частоту признака, величина которой будет статистически значимой. Простейший способ оценки состоит в следующем. Предположим, что азимуты равномерно распределены по окружности. Памятнику прямоугольной формы соответствуют четыре азимута, на каждый из которых приходится по 90 градусов окружности. Поскольку мы положили величину допустимой отстройки измеренного азимута от заданного значения равной $\pm 3,4^\circ$, она соответствует ширине интервала $6,8^\circ$. Тогда вероятность случайного попадания азимута в заданный интервал составляет $p = 6,8/90 \approx 0,076$, или 7,6 %.

Используя биномиальный закон распределения, получим, что при $n = 38$ испытаниях⁸ вероятность случайно попасть 10 раз и больше в заданный диапазон $6,8^\circ$ составляет $P(k \geq 10) = 0,04$ %. Это означает, что азимут истинного севера с частотой $f_1 = 10$ является значимым при $\alpha = 1$ %.

Рассмотрим азимут восхода Солнца в зимнее солнцестояние с частотой $f_2 = 7$. Аналогичным образом найдем, что вероятность попасть в заданный интервал 7 раз и больше составляет $P(k \geq 7) = 2,28$ %, что является значимым при $\alpha = 5$ %. Отметим, что в этом расчете мы не учитываем условную вероятность, т.е. тот факт, что 10 из 38 азимутов уже соответствуют ориентации на истинный север.

Можно сделать оценку еще одним способом, если в качестве успеха принять соответствие азимута одному из двух найденных направлений. Тогда для вероятности успешного исхода в одном эксперименте $p = 2 \cdot 6,8/90 \approx 0,151$ и $n = 38$ испытаниях $P(k \geq 17) = 0,0013$ %. Отметим, что последний вариант оценки можно применять только в том случае, если частоты f_1 и f_2 достаточно велики и близки друг к другу по величине. Таким образом, азимут восхода Солнца в зимнее солнцестояние с частотой $f_2 = 7$ также является статистически значимым.

Аналогичным образом не сложно оценить, что при заданных параметрах задачи статистически значимыми направлениями являются азимуты с частотой $f \geq 6$. Мы рассмотрели два направления, соответствующих азимуту север — юг (10 памятников) и азимуту восхода Солнца в день зимнего солнцестояния (7 памятников).

Во-вторых, астрономически значимые азимуты обнаруживаются как на древних, так и на раннесредневековых памятниках. Это подтверждает наше предположение, что традиция придания памятнику некоей пространственной ориентации была устойчивой и не менялась с течением времени.

⁸ Количество азимутов, которые мы соотносим с одним из значимых направлений, равно 75. Оно получается следующим образом. Ориентации Кой-Крылган-калы и Кульбаскан-калы-1 соответствуют по одному азимуту, Гульдурсуну, который имеет трапециевидную форму, соответствуют три направления, а всем остальным памятникам — $35 \cdot 2 = 70$. Однако следует иметь в виду, что азимуты сооружений, форма которых близка к прямоугольнику, связаны соотношением $A_{i+1} = A_i + 90^\circ \pm \varepsilon$, где ε — небольшая погрешность, вероятно допущенная при строительстве. Поэтому, если один из азимутов попал в заранее заданный интервал с раствором 6,8 градусов, азимут, образующий с ним пару, не сможет в принципе попасть ни в этот же интервал, ни в его окрестность. Фактически не реализуется ситуация, когда на одном памятнике обнаруживаются сразу два значимых направления, кроме ориентации по сторонам света, однако мы рассмотрели этот случай. Поэтому мы не допустим большой ошибки, если будем считать, что в сектор раствором 90 градусов будут в среднем попадать с каждого памятника по одному азимуту.

С помощью шифра можно сделать оценку точности, с которой мы определяем азимут. Если оценка качества снимка не хуже чем «В2», это означает, что ошибка нахождения азимута составляет около $\varepsilon \approx 1,7^\circ$. Для остальных шифров погрешность может быть выше, в данной выборке присутствует четыре таких шифра.

Пока мы сделали проверку только астрономических азимутов, теперь необходимо убедиться, существуют ли другие направления, которые могут быть статистически значимы. Для этого возьмем скользящее окно шириной в $6,8$ градусов⁹ и, последовательно перебрав все азимуты из диапазона $[-15^\circ; 195^\circ]$, вычислим для каждого направления интегральную частоту, т.е. число азимутов, попадающих в данное окно. Результат расчета представлен на рис. 2.

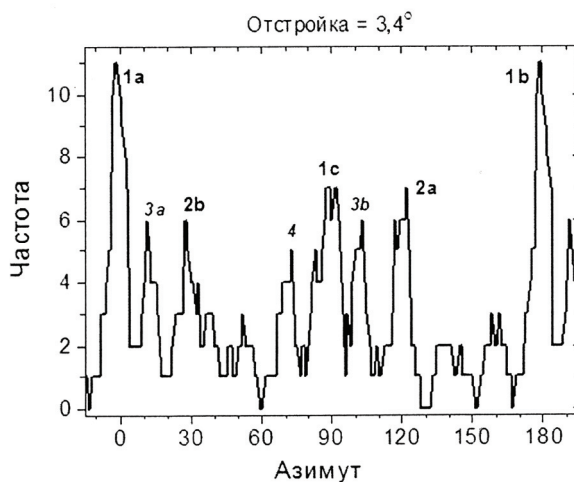


Рис. 2. Результат поиска азимутов.
Fig. 2. Result of azimuths searching.

На рис. 2 каждый из локальных максимумов соответствует некоторым направлениям. Рассмотрим максимумы в порядке убывания частоты. Первую группу азимутов образуют пики 1a, 1b и 1c с интенсивностями $f_{1a} = f_{1b} = 11$ и $f_{1c} = 7$, причем первые два соответствуют ориентации стен сооружения вдоль линии меридиана. Максимум 1c связан с перпендикуляром запад — восток и получается автоматически, если сооружение ориентировано на истинный север, а его форма близка к прямоугольной. Последнее требование выполнено для подавляющего большинства сооружений, а исключений сравнительно немного, например Аяз-3 или Большой Гульдурсун. Также обратим внимание на то, что максимумы 1a и 1b несколько уже по сравнению с 1c. Это может быть объяснено тем, что при строительстве памятника в качестве базовой линии, по которой производилась разметка, выбиралась именно линия меридиана, а перпендикуляр запад — восток был получен из этой линии через геометрические построения. Поскольку в процессе разметки всегда допускаются некоторые ошибки, они складываются с ошибками определения положения севера. То есть во время процедуры построения линии запад — восток одну ошибку мы допускаем при разметке, а вторую наследуем от неточно определенной линии меридиана. В результате линия запад — восток должна быть определена менее точно, чем линия север — юг, что мы и видим из рисунка.

Максимум 2a ($f_{2a} = 7$) соответствует азимуту восхода Солнца в зимнее солнцестояние, а экстремум 2b ($f_{2b} = 6$), отстоящий от него на 90 градусов, является вторичным и также обусловлен тем, что форма большинства памятников близка к прямоугольнику. Как и в предыдущем случае, можно видеть, что интенсивность максимума 2b меньше, чем интенсивность максимума 2a, но он имеет большую ширину¹⁰. Это означает, что строители ориентировали памятник вдоль азимута, соответствующего максимуму 2a, который является астрономическим.

Пара связанных (друг с другом через угол 90 градусов) максимумов 3a и 3b, $A_{3a} = 11^\circ$, $A_{3b} = 103^\circ$ имеет одинаковую интенсивность $f_{2a} = f_{2b} = 6$, однако ни один из них не может быть

⁹ Ширина окна равна удвоенной величине $\Delta A = 3,4^\circ$.

¹⁰ Сравниваем интенсивности сигналов на полувысоте.

Исследование пространственной ориентации архитектурных памятников Хорезма

отождествлен с движением Солнца или Луны. Зная из расчетов значение азимутов, соответствующее обоим экстремумам, и ширину скользящего окна, можно определить, на каких памятниках получается такая пара пиков. Это Бедеркент-кала ($A = 13^\circ$), Беркут-кала ($A = 14,5^\circ$), Думан-кала ($A = 14,0^\circ$), Калалы-гыр-1 ($A = 8,0^\circ$), Миздакхан ($A = 12^\circ$) и Якке-парсан ($A = 9^\circ$). В данной группе усредненная величина азимута составляет ($\bar{A} = 11,7^\circ$) при среднеквадратичном отклонении (далее — СКО) $\sigma = 2,7^\circ$. Относительно высокое СКО позволяет предположить, что данные памятники собраны вместе случайно. Значения азимутов наводят на мысль, что эту группу можно разбить на две подгруппы, в каждой из которых СКО не превышает 1,0. Однако обе подгруппы становятся столь малочисленными, что не пригодны для статистического анализа.

Максимум 4 соответствует усредненному азимуту $A = 71,7^\circ$ (при $\sigma = 2,3^\circ$), а его интенсивность составляет $f_{2b} = 5$. Особенность данного случая в том, что три из пяти азимутов относятся к близкорасположенным памятникам, принадлежащим к одному комплексу. Аяз-1 ($A = 75,5^\circ$), Аяз-2 ($A = 70^\circ$), Аяз-3 ($A = 70,5^\circ$), Большой Кыркыз ($A = 72,25^\circ$), Топрак-кала ($A = 70^\circ$). Комплекс Аяз является разновременным, но если предположить взаимосвязь пространственной ориентации памятников, что, по нашему мнению, наиболее вероятно, то они не могут быть рассмотрены как три независимых азимута. Если же азимуты комплекса Аяз объединить в один, то в данной группе останутся только три азимута, анализировать которые с точки зрения статистики бессмысленно.

Мы рассмотрели все наиболее интенсивные максимумы на рис. 1 и не смогли выделить какие-либо другие азимуты по отношению к уже найденным. Значит, таких азимутов просто нет.

Астрономические азимуты и точность ориентации памятников

Расчеты показывают, что 15 из 23 найденных азимутов попадают в интервал 1σ , когда $\Delta A < \varepsilon$, а оставшиеся 8 находятся внутри удвоенного интервала $\Delta A < 2\varepsilon$. Это означает, что полученное нами распределение невязок близко к нормальному. Анализ знаков невязок показывает, что в 8 случаях знак положителен, в 12 отрицателен, а в 3 случаях он равен нулю, т.е. мы имеем немного смещенное субнормальное распределение с положением центра $x_c = -0,52 \pm 1,59$.

Аналогичная картина получится, если рассмотреть только статистически значимые азимуты: 11 из 17 попадут в интервал 1σ , а остальные 6 — в 2σ . Знак невязки ΔA будет положителен в 7 случаях, отрицателен в 8 и в двух случаях будет равен нулю. При этом $x_c = -0,38 \pm 1,69$.

Следует обратить внимание на то, что анализируемые нами азимуты являются разнородными. В отличие от солнечных, лунных и звездных азимутов, направление линии меридиана нельзя получить с помощью прямого наблюдения восхода или захода светила. Определение положения севера требует от строителей сооружения специальных знаний и навыков в области геометрии, при этом погрешность определения направления на север будет зависеть от примененного метода ориентации. Вообще говоря, вопрос нахождения линии меридиана может являться предметом отдельного исследования.

С остальными азимутами ситуация тоже не столь проста. Наши модельные расчеты показали [Никифоров, 2015, с. 100–120], что из-за возмущения наклона лунной орбиты по гармоническому закону с периодом $P = 173^d$ и амплитудой $a = 10'$, азимуты восхода и захода смещаются на величину до $|\Delta A| \approx 0,4^\circ$. Причем наиболее вероятным событием является наблюдение восхода Луны при смещенных положениях. Поэтому азимуты восхода и захода Луны определяются в среднем с худшей точностью, чем солнечный, что мы продемонстрировали на примере Стоунхенджа [Там же, с. 100–120, табл. 1].

Приведенные данные позволяют сделать вывод, что все найденные азимуты имеют погрешности ориентации не выше 1,5–2 градусов. Получить более определенный результат мы в настоящее время не способны. В этой ситуации хорошим решением было бы выполнение новых измерений пространственной ориентации памятников в полевых условиях и сравнение этих измерений с результатами обработки изображений GE. Однако рассчитывать на проведение специальной экспедиции в обозримом будущем едва ли возможно.

Астрономические азимуты в контексте культуры

Проведенный выше анализ позволяет установить наличие двух статистически значимых азимутов. Следует отметить, что некоторые исследователи уже обращали внимание на практику ориентации сооружений вдоль линии меридиана [Толстов, 1948; Булатов, 1978; и др.], поэтому обнаружение этих азимутов не является чем-то неожиданным. Новизна результата, полученного в настоящей работе, заключается в том, что в отличие от предыдущих исследователей мы восполь-

зовались достаточно точными оценками азимутов, которые пригодны для статистического анализа. Кроме того, в отличие от М.С. Булатова мы рассмотрели памятники, принадлежащие к единой культурной традиции и локализованные в рамках территории одного государства.

С точки зрения исследования культурных традиций, по всей вероятности, следует исключить принципиальную возможность получения точного ответа на вопрос, почему в древнем обществе были актуальны одни астрономически значимые направления, а другие не использовались вообще. Мы можем только строить догадки, учитывая (опираясь на систему современных представлений о целесообразности) практическое применение этих азимутов в повседневной жизни древнего человека. С другой стороны, можно сделать попытку обосновать их наличие религиозными традициями и поискать их отражение в письменных источниках.

Обратим внимание на один эмпирический факт. Внутренняя планировка крепостей и городов Хорезма, как правило, выравнена по отношению к стенам, имеющим фортификационное назначение. В частности, это очень хорошо видно на спутниковом снимке комплекса Топрак-кала, где ориентация планировок «городской», «дворцовой» и «храмовой» частей строго параллельна. Таким образом, если стены памятника ориентированы вдоль определенного азимута, значит, и все внутреннее построение, включая культовые сооружения, будут иметь аналогичную направленность.

Ориентация сооружения вдоль линии меридиана может быть актуальна по двум причинам. Визирование меридиана позволяет очень просто определять момент наступления местного полудня, а визирование линии параллели дает возможность оценить момент приближения равноденствий. Следовательно, ориентация сооружения по линии север — юг может иметь конкретную пользу в повседневной жизни.

Культурную значимость дня зимнего солнцестояния в Хорезме и соседних государствах можно проследить по данным Бируни. Автор пишет, что через шесть месяцев после Науруза (который, по крайней мере, в Сасанидское время приходился на летнее солнцестояние) персы, согдийцы и хорезмийцы отмечали праздники, связанные с зимним солнцестоянием.

«[Месяц] Фагхакан. Первый день этого месяца назывался Ним-Сарда, что означает “половина года”. Во второй день — праздник, который согдийцы называют Мнид-Хвара. В этот день [согдийцы] собираются в храмах огня и едят некое [кушанье], изготовляемое из просяной муки, масла и сахара. Некоторые люди помещают Ним-Сарда на пять дней раньше этого праздника, то есть в первый день Мир-Маха, чтобы он [отмечался] согласно с мнением персов. А у персов было обязательно считать половину года, когда от начала года пройдет шесть месяцев и два с половиной дня» [Бируни, 1957, с. 254].

«[Месяц Умри]. Первый день этого месяца [называется] Аздаканд-Хвар — в переводе: “день, когда едят хлеб [испеченный] с жиром”. В этот день [люди] укрывались от холода, собирались вокруг горящих жаровен и ели хлеб [испеченный] с жиром» [Там же, с. 256].

Таким образом, спустя шесть месяцев после Науруза и летнего солнцестояния, в первый день месяца *Фагхакан*, жители Согда отмечали праздник Ним-Сарда, что в переводе означает «половина года». Название праздника указывает на связь с Наурузом и летним солнцестоянием, от которого отсчитывается календарный год. На следующий день согдийцы собирались в храмах (или домах) огня и ели некое кушанье, изготовляемое из просяной муки, масла и сахара. В календаре хорезмийцев шестому месяцу после летнего солнцестояния соответствует месяц Умри, в первый день которого люди ели хлеб, испеченный с жиром.

Из описаний Бируни следует, что жители Согда и Хорезма отмечали один и тот же праздник, связанный с наступлением зимнего солнцестояния. На это прямо указывает его согдийское название, а также шестимесячный интервал, прошедший от момента начала года (летнего солнцестояния). Значимость зимнего солнцестояния характерна не только для среднеазиатской традиции.

«В 17-й день [кануна первого] — ничего не упомянуто... Этот день называют “большое рождество”, имея в виду зимний солнцеворот; говорят, что в этот день свет выходит из границ убывания в границы увеличения и что люди начинают расти и здороветь, тогда как джины чахнут и погибают...

Ка'б-аль-Ахбар говорит, что в этот день Солнце стояло над Иисусом Навиным в течение трех часов в облачный день. То же самое рассказывают об остановке Солнца глупые шииты, относя это к повелителю правоверных Али ибн Абу-Талибу...

Яхья ибн Али-аль-Анбарн, христианский писец, говорит, что место восхода Солнца во время зимнего солнцеворота является истинным востоком, что Солнце восходит [тогда] в середине рая и что в этот день мудрецы воздвигают алтари» [Бируни, 1957, с. 271–272].

Последняя цитата акцентирует внимание на христианах. Учитывая все имеющиеся свидетельства, можно предположить наличие общей культурной традиции отмечать явление поворо-

Исследование пространственной ориентации архитектурных памятников Хорезма

та Солнца и увеличение продолжительности дня. Таким образом, значимость азимута, соответствующего зимнему солнцестоянию, находит отражение в культурных представлениях.

Остальные обнаруженные астрономические азимуты, связанные с движением Луны, статистически не значимы. Можно сделать попытку увеличить объем выборки за счет плохо сохранившихся памятников, которые не видны из космоса и поэтому не были проанализированы с помощью программы GE. Однако следует иметь в виду, что таких объектов немного, и они не смогут улучшить статистику существенным образом. С другой стороны, вполне разумно предположить, что выборка из 38 сооружений достаточно многочисленна, чтобы отражать общую тенденцию генеральной совокупности.

Практически это означает, что мы не сможем подтвердить наличие других астрономических азимутов методами статистики, даже если они на самом деле присутствуют. Однако существование того или иного азимута может быть обосновано какими-то культурными свидетельствами, лучше всего — информацией из письменных источников.

В данном случае следует упомянуть о нашем исследовании пространственной конфигурации башен памятника Кой-Крылган-кала [Болелов и др., 2015]. Проведенный анализ показал, что с помощью девяти башен, равномерно расставленных по окружности внешней стены, можно было зашифровать пять астрономически значимых азимутов, связанных с направлением астрономического севера, азимутами восхода и захода Солнца в день зимнего солнцестояния и азимутами гелиакального восхода и захода Плеяд. Наша гипотеза состояла в том, что такая геометрическая схема возникла не случайно, а была реализована специально архитекторами Кой-Крылган-калы. Настоящее исследование подтверждает вывод о культурной значимости азимутов, связанных с истинным севером и зимним солнцестоянием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Андреанов Б.В.* Древние оросительные системы Приаралья. М.: Наука, 1969. 252 с.
- Бируни А.Р.* Памятники минувших поколений / Пер. и прим. М.А. Салье // Избранные произведения. Т. I. Ташкент: ФАН, 1957. 516 с.
- Болелов С.Б., Колганова Г.Ю., Никифоров М.Г.* Элементы гармонизации в архитектуре памятника Кой-Крылган-кала // КСИА. 2015. Вып. 237. С. 177–187.
- Болелов С.Б., Колганова Г.Ю., Никифоров М.Г.* Анализ архитектурных памятников Хорезма на основе особенности фортификации // КСИА. 2016. Вып. 242. С. 129–145.
- Булатов М.С.* Геометрическая гармонизация в архитектуре Средней Азии в IX–XV вв. М.: Наука, 1978. 380 с.
- Кой-Крылган-кала* — памятник культуры древнего Хорезма IV в. до н.э. — IV в. н.э. Труды Хорезмской археолого-этнографической экспедиции. Т. V / Отв. ред. С.П. Толстов, Б.И. Вайнберг. М.: Наука, 1967. 348 с.
- Колганова Г.Ю., Никифоров М.Г., Рейджд В.* Археoaстрономические исследования древнехорезмийского комплекса Кой-Крылган-кала // Восток (Oriens). 2014. № 4. С. 21–36.
- Никифоров М.Г.* Проблемы современной археоастрономии // Историко-астрономические исследования. 2015. Вып. 38. С. 100–139.
- Неразик Е.Е.* Сельские поселения Афригидского Хорезма: По материалам Беркут-калинского оазиса. М.: Наука, 1966. 153 с.
- Толстов С.П.* Древний Хорезм: Опыт историко-археологического исследования. М.: МГУ, 1948. 352 с.

S.B. Bolelov*, G.Yu. Kolganova, M.G. Nickiforov*****

*State Museum of Oriental Art
Nikitsky Blvd., 12a, Moscow, 119019, Russian Federation

**Institute of Oriental Studies, RAS
Rozhdestvenka st., 12, Moscow, 107031, Russian Federation

***Moscow State Linguistic University
Ostozhenka st., 38, Moscow, 119034, Russian Federation
E-mail: bsb1958@yandex.ru;
kolganova_gy@mail.ru;
followup@mail.ru

ASTRONOMICAL ORIENTATION OF ARCHITECTURAL MONUMENTS OF KHOREZM

The paper is aimed at studying the astronomical orientation of Khorezmic architectural monuments. By the term «astronomical orientation», the authors understand the alignment of the building elements with astronomically significant directions corresponding to the directions of the world, sunrise and/or sunset azimuths at solstices

and azimuths of the rising/setting of the Moon at its northern and southern extremes. Analysis of the accuracy of monument plans showed that they could not be used to solve the issue of determining astronomical orientation. The main reason for this consists in the lack of unification in determining the position of the north. Verification showed that both magnetic north and true north could be picked on archaeological plans, and in some cases, one might suspect an incorrect recalculation from magnetic to true meridian. The unsuitability of earlier archaeological plans for the analysis of astronomical orientation severely limits the number of objects that can be used, since many of the monuments described in the last century works do not exist today. Therefore, in order to analyse astronomical orientation, it is necessary to perform new ground-based measurements. However, due to the impossibility of conducting new measurements during the field studies, we took the satellite imagery of Google Earth, which, along with the obvious advantage, leads to some restrictions. For example, a monument should be visible from space and have geometrical dimensions much larger than the pixelation of the image. As a result, for studying astronomical orientation, it was possible to select 37 objects, which have the shape of a convex polygon. The use of statistical analysis allowed us to establish the presence of two significant azimuths: alignment of the monument with the meridian line and with the sunrise azimuth at the winter solstice. The remaining astronomical azimuths are met in isolated cases, but we cannot confirm their presence due to a small number. It should be noted that some researchers have already paid attention to the practice of orienting structures along the meridian line, so the detection of this azimuth is not unexpected. However, compared to previous works, we have obtained accurate azimuth estimates, which are suitable for statistical analysis. In addition, the considered monuments belong to a single cultural tradition and are located within the same historical region. The cultural significance of the winter solstice day in Khorezm and neighbouring regions can be proved by Biruni's information. Following his descriptions, the residents of Sogd and Khorezm celebrated the same holiday associated with the onset of the winter solstice.

Key words: Central Asia, azimuths, astronomical traditions in architecture, astronomy and culture.

DOI: 10.20874/2071-0437-2019-45-2-085-096

REFERENCES

- Andrianov B.V. (1969). *Ancient irrigation systems of Aral region*, Moscow: Nauka.
- Biruni A.R. (1957). Monuments of past generations. *Izbrannye proizvedeniia, I*, Tashkent: FAN.
- Bolelov S.B., Kolganova G.Yu., Nickiforov M.G. (2015). Elements of harmonization in the architecture of the monument Koy-Krylgan-Kala. *Kratkie soobshcheniia Instituta arkheologii*, (237), 177–187.
- Bolelov S.B., Kolganova G.Yu., Nickiforov M.G. (2016). Analysis of architectural monuments of Khorezm based on a fortification feature. *Kratkie soobshcheniia Instituta arkheologii*, (242), 129–145.
- Bulatov M.S. (1978). *Geometric harmonization in the architecture of Central Asia in the 9th–15th centuries*, Moscow: Nauka.
- Tolstov S.P. (1948). *Ancient Khorezm: The experience of historical and archaeological research*, Moscow: MGU.
- Tolstov S.P., Vainberg B.I. (Eds.) (1967). *Koy-Krylgan-Kala is a cultural monument of the ancient Khorezm of the 4th century BC — 4th century AD*, Moscow: Nauka.
- Kolganova G.Yu., Nickiforov M.G., Reijs V. (2014). Archaeoastronomic studies of the ancient Khorezmian complex Koy-Krylgan-Kala. *Vostok (Oriens)*, (4), 21–36.
- Nerazik E.E. (1966). *Rural settlements of Afrigid's Khorezm: Based on materials from the Berkut-Kalinsky oasis*, Moscow: Nauka.
- Nickiforov M.G. (2015). Problems of modern archaeoastronomy. *Istoriko-astronomicheskie issledovaniia*, (38), 100–139.



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Submitted: 15.03.2019

Accepted: 01.04.2019

Article is published: 28.06.2019