

УДК 902.2

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ ПРАВОБЕРЕЖНОГО ХОРЕЗМА

© 2022. Антонова Наталья<sup>1</sup>, Болелов Сергей<sup>2</sup>, Никифоров Михаил<sup>3</sup>

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова<sup>1</sup>,

Государственный музей искусства народов Востока<sup>2</sup>,

Московский государственный лингвистический университет<sup>3</sup>

---

**Ключевые слова:** Хорезм, деградация памятников, антропогенные факторы, моделирование разрушения, реставрация, консервация.

*С помощью сравнения исторических и современных спутниковых снимков получены оценки скорости деградации пяти монументальных сооружений Правобережного Хорезма и определены приблизительные даты их разрушения. Показано, что явление разрушения памятника связано с двумя процессами, которые условно можно назвать «медленный» и «быстрый».*

*Первый – постепенное медленное разрушение объекта в течение столетий под действием атмосферных осадков, ветра и перепадов температур. Второй процесс – быстрое разрушение памятника, наблюдаемое в течение нескольких последних десятилетий, связан с хозяйственной деятельностью человека – мелиорацией пустынь. Установлено, что основным фактором, влияющим на быстрое разрушение памятника, является близость его основания к уровню грунтовых вод. Чем выше уровень грунтовых вод, тем интенсивнее происходит деградация стен.*

*Предложена математическая модель, позволяющая описать процесс разрушения памятника, сделанного из пахсы и сырцового кирпича. С помощью данной модели можно получить численную оценку, какой глубины нужно сделать дренаж, чтобы полностью нивелировать процесс деградации памятника под действием грунтовых вод. Предложенная модель может быть полезна для принятия решений по методам реставрации и консервации объекта.*

*Отметим, что близость высоты основания памятника к уровню грунтовых вод является очень существенным фактором, влияющим на быстрое разрушение памятника, но вероятно не единственным.*

---

## ХОРАЗМ ЁНГ ҚИРҒОҒИ АРХЕОЛОГИЯ ЁДГОРЛИКЛАРИНИ БУЗИЛИШИНИ МОДЕЛЛАШТИРИШ ВА ТЕЗЛИГИНИ БАҲОЛАШ

© 2022. Антонова Наталья<sup>1</sup>, Болелов Сергей<sup>2</sup>, Никифоров Михаил<sup>3</sup>

М. В. Ломоносов номидаги Москва давлат университети<sup>1</sup>,

Шарк санъати давлат музейи<sup>2</sup>, Москва давлат лингвистик университети<sup>3</sup>.

---

**Калит сузлар:** Хоразм ёдгорликларининг таназзулга учраши, антропоген омиллар, вайронагарчилик, реставрация, консервация, моделлаштириш.

**Изоҳ:** *Тарихий ва замонавий сунъий йўлдош тасвирларини солиштириши орқали Хоразмнинг ўнг қирғоғидаги бешта монументал иншоотнинг бузилиши даражаси ҳисоб китоблари олинди ва уларнинг тахминан вайрон бўлиши саналари аниқланди. Ёдгорликнинг бузилиши жараёни шартли равишда “секин” ва “тезкор”, деб баҳоланган. Биринчиси, объектнинг асрлар давомида ёгингарчилик, шамол ва харорат ўзгариши таъсирида аста-секин вайрон бўлиши; Иккинчи жараён – сўнги бир неча ўн йилликларда қузатилган ёдгорликнинг тез вайрон бўлиши инсон омили, иқтисодий фаолияти, чўл мелиорацияси билан боғлиқ кечган. Аниқланишича, ёдгорликнинг тез вайрон бўлишига*

*асосий омил уни пойдеворининг ер ости сувлари сатҳига яқинлигидир. Ер ости сувлари даражаси қанчалик баланд бўлса деворларнинг деградацияси шунчалик кучли бўлади. Паҳса ва хом гиштан қурилган ёдгорликларнинг бузилиши жараёнини тасвирлаш учун математик модел таклиф қилинган. Ушбу модел ёрдамида ер ости сувлари таъсирида ёдгорликнинг бузилиши жараёнини тўлиқ текислаш учун қанчалик чуқур дренаж қилиши кераклиги ҳақида тавсия олиши мумкин. Таклиф этилаётган модел объектни тиклаш ва консервация қилиши усуллари бўйича қарор қабул қилиши учун фойдали бўлиши мумкин. Ёдгорлик пойдеворининг баландлигининг ер ости сувлари даражасига яқинлиги ёдгорликнинг тез вайрон бўлишига таъсир қилувчи муҳим омил, лекин ягона эмаслиги таъкидланган.*

## **Введение.**

Настоящая работа посвящена изучению вопроса сохранности археологических памятников правобережного Хорезма. В середине прошлого века, когда на землях древнего орошения вела активную работу Хорезмская археолого-этнографическая экспедиция, на территориях мертвых оазисов были обнаружены десятки стоянок эпохи бронзы, античных поселений, замков и средневековых усадеб. Параллельно научным исследованиям началось интенсивное освоение территорий – осуществлялась мелиорация земель, начали появляться современные поселения и города, что привело к существенному сокращению числа археологических объектов. Например, из более чем 150 сооружений, расположенных вдоль Большого Кыркызского канала, в настоящее время сохранилось лишь около полутора десятков наиболее крупных памятников, а вся остальная территория была распахана.

Однако даже сохранившиеся до нашего времени памятники деградировали под действием косвенных антропогенных факторов. Это означает, что разрушение объекта происходит не только по причине прямого физического воздействия, а из-за изменения экологической обстановки. Хотя этот эффект не столь заметен на протяжении нескольких лет или даже десятилетия, сравнение современных снимков с фотографиями 1950–1970-х годов показывает, что внешний вид многих памятников претерпел существенные изменения. Простояв в пустыне сотни лет, сооружения к середине прошлого тысячелетия уже имели разную степень сохранности. Однако сравнение старых и новых снимков свидетельствует о том, что процесс разрушения в последнее время существенно ускорился.

В связи с этим актуальной является оценка скорости деградации памятников. Кроме того, важно определить, какие из них разрушаются наиболее быстро, попытаться оценить перечень факторов, влияющих на разрушение памятников и, исходя из этого, предложить мероприятия, позволяющие замедлить процесс разрушения.

**Критерии оценки сохранности памятника.** В первую очередь, необходимо сформулировать критерии, по которым мы будем определять степень сохранности памятника и оценивать скорость его разрушения. Это должны быть простые, легко измеряемые признаки, которые имеют простую интерпретацию. Кроме того, нужно иметь подходящий источник данных, по которому будет производиться оценка. Например, в последние годы появились дроны, позволяющие проводить высокоточное лазерное сканирование территории. Это отличный инструмент, однако он позволяет провести лишь современное измерение памятника, которое не с чем сравнить, поскольку раньше таких приборов не было.

Наиболее доступным вариантом является использование для оценки сохранности объектов снимков, причем в первую очередь следует выделить космоснимки из прог-

раммы Google Earth (GE). Для территории правобережного Хорезма интерактивные фотографии высокой степени качества доступны примерно с начала нулевых годов по настоящее время, что дает временной интервал около 20 лет. Это является сравнительно небольшим периодом наблюдения для получения точных оценок.

В настоящее время доступны рассекреченные спутниковые космоснимки территории СССР, сделанные американскими спутниками-шпионами. Эти изображения имеют по нынешним меркам весьма невысокое разрешение, соответствующее примерно 2,5 метрам в 1 пикселе, что значительно уступает по качеству детализации изображениям, которые доступны из программы GE. С другой стороны, по старым снимкам можно оценить эволюцию памятника в течение последних 50 лет, а не только за 20. Поскольку старые изображения позволяют проследить эволюцию памятника на большем временном интервале, а новые на коротком, но в лучшем качестве, мы будем использовать для дальнейшего анализа как старые, так и новые спутниковые снимки.

В качестве первого критерия рассмотрим сохранность периметра стен. Для этого нужно в любом графическом редакторе определить две величины, периметр памятника  $P$  и сумму длин сохранившихся стен  $S$ . Тогда коэффициент сохранности будет равен  $C=S/P$ . Очевидно, что для полностью сохранившегося памятника  $P=S$ , следует что  $C=1$ , а для полностью разрушенного  $C=0$ .

Преимущество данного критерия заключается в том, что он просто подсчитывается и имеет понятную интерпретацию. Сохранность стены или ее фрагмента можно определить по фотографии – стена должна отбрасывать четкую тень. Если тень есть, будем считать, что стена сохранилась, если же она незаметна, значит стена разрушена. Такой способ оценки может показаться некорректным, поскольку стены даже хорошо сохранившихся памятников, например Аяз-калы-1 или Кургашин-калы, имеют следы значительной деградации. Однако нашей целью является установление значения порога, начиная с которого мы будем считать стену разрушенной.

Без потери общности в качестве порогового значения примем, что если оплывшая стена образует с плоскостью горизонта угол меньше 35 градусов, то такая стена будет считаться разрушенной. Чтобы стена с меньшим углом ската не отбрасывала тень, дата и время съемки на широте исследуемых памятников должны быть таковыми, чтобы Солнце было расположено над горизонтом выше 35 градусов. Учитывая, что исследуемые памятники расположены на широте  $\varphi=42^{\circ}$ , а съемка местности со спутника ведется, когда Солнце находится вблизи меридиана  $A=180^{\circ}$  с возможным отклонением  $\pm 20$  градусов, получим, что для оценки можно использовать спутниковые снимки с датами полета с 1 марта до 13 октября. В этом случае стена с углом ската менее 35 градусов не будет отбрасывать тень на момент съемки.

Если определить параметр  $C$  для разных изображений, можно построить зависимость  $C(t)$ , которая будет описывать процесс разрушения памятника.

Второй вариант оценки сохранности памятника заключается в визуальной оценке его состояния, с помощью дискретной пятибалльной шкалы. Ее идея заключается в том, что сначала нужно сформулировать семантическое описание уровня сохранности, а затем визуально соотнести его с тем, что видно на фотографии. В принципе градация шкалы может быть произвольной, однако при слишком крупном разбиении, например, на 2–3 класса, оценки окажутся малоинформативными. При слишком мелком разбиении число категорий классов получится слишком большим и оценки будут неточными. Пример пятибалльной шкалы представлен в таблице 1.

Далее, определив сохранность памятника  $C$  по самым первым доступным спутниковым снимкам начала 1970-х годов и по самым последним из программы GE, мы получим изменение сохранности объекта за последние полвека.

Оценка	Описание состояния объекта
0	Памятник полностью разрушен. На снимке видны оплывшие стены и оплывшие башни.
1	Остались небольшие фрагменты стен, некоторые башни, или укрепляющий стену донжон.
2	Сохранилось от трети до половины стен памятника.
3	Сохранилось более половины стен памятника, но заметны следы разрушения.
4	Памятник разрушен незначительно или имеет идеальную сохранность.

Табл. 1. Шкала оценки сохранности памятников

1 жадвал. Ёдгорликларнинг сақланишини баҳолаш шкаласи

Table 1. Monument condition assessment scale

### Моделирование деградации памятников с использованием критерия сохранности стен.

Для изучения процесса деградации рассмотрим пять достаточно крупных и хорошо известных памятников Правобережного Хорезма: Большой Гульдурсун, Малый Кыркыз, Беркут-кала, Кават-кала и замок № 60 (Яглы-кала) из Беркут-калинского оазиса.

Рассмотрим восемь изображений Беркут-калы начиная с 03 марта 2003 года по 22 апреля 2021, взятые из программы GE. Даже визуальное сравнение соседних кадров позволяет установить постепенное разрушение памятника, рис. 1.

Однако более информативными являются зависимости изменения коэффициента сохранности  $C(t)$ , позволяющие численно охарактеризовать процесс деградации. Для нахождения зависимостей сначала нужно получить оценки сохранности по спутниковому снимку на дату съемки. Затем с помощью модели линейной регрессии вычисляются функции сохранности  $C(t)$ , которые на рис. 2 обозначены сплошными линиями.



Рис. 1. Восемь снимков Беркут-калы, полученные из программы GE, начиная с 02 марта 2003 года до 22 апреля 2021. На снимках заметно постепенное разрушение памятника

Расм-1. Беркут-қалғанинг 2003 йил 02 мартдан 2021 йил 22 апрелгача GE дастурдан олинган сак-кизта тасвири. Расмларда ёдгорликнинг босқичма-босқич вайрон бўлганлиги кўрсатилган

Figure 1. Eight images of Berkut-kala obtained from the GE program, from March 02, 2003 to April 22, 2021. The images show the gradual deterioration of the monument

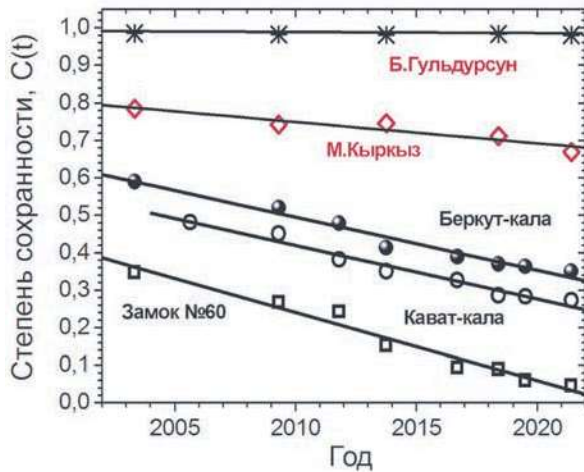


Рис. 2. Процесс деградации памятников. Сплошными линиями обозначены функции сохранности каждого памятника, а точками — значения индекса  $C$  на дату съемки

Расм. 2. Ёдгорликларнинг таназзулга учраши жа-  
раёни. Каттик чизиклар хар бир сайтнинг сақлаш  
функцияларини, нукталар эса суров санасида  $C$   
индексининг кийматларини курсатади

Figure 2. The process of degradation of monuments.  
The solid lines show the preservation functions of  
each site, and the dots show the  $C$  index values at the  
survey date.

соответствующая данному памятнику, параллельна оси времени, что означает отсутствие разрушения за время наблюдений. В таблице 2 сведены основные показатели, характеризующие разрушение памятников, вычисленные с помощью моделей.

Отметим, что полученные выше оценки являются относительными, их нужно правильно интерпретировать. Во-первых, под разрушением памятника мы понимаем оплыв его стен ниже критического значения. При этом сам памятник никуда не исчезнет. Кроме того, даты разрушения были найдены по линейной модели, которая предполагает постоянную скорость деградации. В том случае, когда процент сохранности низкий, могут быть значительные отклонения от найденного эмпирически линейного закона. Например, Уй-кала на 2014 год имела сохранность  $C(t)=5\%$ , и с тех пор по настоящее время это значение не изменяется. Хотя от всего периметра стен остались лишь пара небольших фрагментов в южной стороне, которые примыкают к донжону. Они могут простоять очень долго, но фактически памятник уже разрушен.

№	Название	Сохранность на 2020 г., %	Скорость разрушения, %/год	Дата полного разрушения
1	Замок №60	6	1.82	2023
2	Кават-кала	29	1.43	2040
3	Беркут-кала	37	1.42	2046
4	Малый Кырк-кыз	69	0.57	2141
5	Большой Гульдирсин	98	>0.01	не определено

Табл. 2. Динамика разрушения памятников  
2 жадвал. Ёдгорликларнинг бузилиш динамикаси  
Table 2. Dynamics of deterioration of monuments

Основной вывод, который сразу следует из рис. 2, заключается в том, что все рассмотренные памятники, кроме Б. Гульдурсуна, активно разрушаются, и этот процесс можно зафиксировать за 10–20 лет. Т. е. процесс деградации происходит достаточно быстро. Памятники имеют разную скорость разрушения, которая визуально определяется наклоном регрессионной прямой к оси времени. Чем больше угол наклона, тем выше скорость разрушения объекта, а момент пересечения прямой с осью времени будет соответствовать полному разрушению памятника.

Наиболее быстро разрушается замок № 60, и при этом он имеет самую низкую сохранность даже на момент первой съемки. Процесс деградации Кават-калы и Беркут-калы происходит примерно с одной скоростью, вдвое медленнее них разрушается Малый Кырккыз, и только Большой Гульдурсун оказался не подвержен изменениям. Регрессионная прямая,

Во-вторых, в качестве порогового критерия деградации стены мы выбрали значение угла ската стены  $\alpha=35^\circ$ , однако это значение является параметром модели. Очевидно, что если взять меньшее значение, например  $\alpha=30^\circ$ , то возрастет процент сохранности, а дата разрушения памятника сдвинется в будущее. И наоборот, при большем значении  $\alpha=40^\circ$  сохранность памятника уменьшится, дата разрушения омолодится. Т. е. численные оценки зависимы от этого критерия.

Тем не менее результаты, представленные в таблице 2, важны, поскольку они позволяют оценить интенсивность разрушения памятников и сравнить скорости их деградации друг с другом.

**Моделирование деградации памятников с использованием дискретного критерия визуальной оценки состояния памятника.**

Применение этого метода позволяет не только расширить временной интервал наблюдения за памятниками с 20 до 50 лет, но и существенно увеличить количество самих памятников. Хотя критерий сохранности стен, использованный в предыдущем пункте, позволяет получить точные оценки, число памятников, к которому его можно было бы применить, невелико. Проблема в том, что к 2000 г., когда появились пригодные для анализа снимки GE, большая часть памятников оплыла настолько, что их уже нет смысла анализировать.

Для дальнейшего анализа нам подойдут все памятники, которые удовлетворяют двум условиям. Во-первых, объект на старом спутниковом снимке должен иметь достаточные геометрические размеры, чтобы можно было оценить его состояние, и, во-вторых, он должен сохраниться до нашего времени. Далее визуально оценим с помощью таблицы 1 сохранность каждого памятника в прошлом  $C_0$ , в настоящем  $C_1$  и определим изменение состояние объекта за 50 лет  $\Delta=C_0-C_1$ . В качестве примера на рис. 3 приведены старые снимки 1969 г. и современные снимки 2019–2021 гг. для четырех памятников.



Рис. 3. Сравнение сохранности памятников по старым (слева) и современным (справа) спутниковым снимкам. 3 а – Тешик-кала, 3 б – Уй-кала, 3 в – Джанбас-кала, 3 г – Большой Кыркыз  
 Расм-3. Эски (чапда) ва замонавий (унгда) сунъий юлдош тасвирлари буйича ёдгорликларнинг сакланишини таккослаш. 3 а – Тешик-калъа, 3 б – Уй-калъа, 3 в – Жанбас-калъа, 3 г – Катта Кирккиз.  
 Figure 3. Comparison of the preservation of monuments according to old (left) and modern (right) satellite images. 3 a – Teshik-kala, 3 b – Uy-kala, 3 c – Dzhanbas-kala, 3 d – Bolshoy Kyrkыз

Из рис. 3 видно, что на старом снимке 1969 г. Тешик-кала имеет практически идеальную сохранность, которая соответствует оценке  $C_0=4$ , но на современном снимке мы видим сильно разрушенный памятник  $C_1-1$ , таким образом, изменение состояния составляет  $\Delta=4-1=3$  балла за 50 лет. За это же время сохранность Джанбас-калы изменилась на один балл  $C_0=4$ ,  $C_1=3$ ,  $\Delta=1$ , Уй-кала разрушилась с  $C_0=3$  до  $C_1=0$  практически полностью,  $\Delta=3$ , при этом состояние Б. Кыркыза не изменилось  $C_0=C_1=1$ ,  $\Delta=0$ . Таким образом, за прошедшие полвека памятники подверглись очень разному воздействию. Одни разрушились больше, другие меньше, а есть и такие, состояние которых не изменилось. В связи с этим было бы актуально попытаться выделить факторы, влияющие на сохранность памятника.

Отметим очевидный факт, что на первых спутниковых снимках самую высокую сохранность, которой соответствует класс 4, имели только 13 из 32 рассмотренных объектов, таблица 3. Все остальные сооружения имели частичную сохранность, откуда следует, что на протяжении многих веков памятники медленно разрушались естественным образом, под действием природных явлений.

Наиболее очевидными факторами, оказывающими влияние на разрушение памятников, являются атмосферные осадки, влажность воздуха, ветер, диапазон изменения температур, что в совокупности приводит к естественному разрушению из-за процесса эрозии. Однако, учитывая, что территория Правобережного Хорезма достаточно компактна, то и природные факторы действовали на все археологические объекты одинаково, хотя сам климат мог изменяться. Индивидуальная сохранность того или иного объекта определяется другими причинами, например, материалом и конструкцией. Известно, что пахса размывается быстрее сырцового кирпича, а стена, построенная на цоколе, имеет преимущество перед стеной, построенной на такыре.

Однако из полученных в таблице двух оценок можно заключить, что в настоящее время процесс разрушения существенно ускорился, что, видимо, обусловлено иными причинами. Можно предположить, что процесс интенсивного разрушения древних монументальных сооружений связан с хозяйственной деятельностью – мелиорацией и освоением мертвых оазисов. Поэтому объясняющие переменные модели или факторы должны быть так или иначе связанными с обводнением территории.

В качестве объясняющих переменных мы рассмотрели два фактора – расстояние от памятника до ближайшего канала с водой и высоту памятника над уровнем грунтовых вод. Расстояние от памятника до канала  $d$  может быть измерено с помощью интерактивной карты программы GE или любой другой карты, поэтому получить точные оценки этой переменной не составит никаких затруднений.

Несколько сложнее обстоят дела с определением высоты основания памятника над уровнем грунтовых вод  $h$ . Инструменты программы GE позволяют измерять высоту выбранной точки поверхности над уровнем моря, что можно использовать для реконструкции данного параметра. Высоту горизонта памятника  $H_{\Pi}$  можно получить усреднением четырех отметок, взятых в его вершинах. Уровень воды  $H_B$  аналогичным образом получается усреднением высоты двух-трех точек берега канала. К сожалению, измерить сам уровень воды в канале таким способом не получится, но понятно, что в наиболее обводненное время года он будет ниже уровня берега примерно на одну и ту же величину, которая составляет 1–2 метра, рис. 4.

Таким образом, искомую высоту памятника над уровнем грунтовых вод можно оценить как разность  $H_{\Pi}$  и  $H_B$ :  $h = H_{\Pi} - H_B$ . Проблема в том, что программа GE не всегда правильно описывает поверхности, что особенно заметно на знакомой местности. Например, согласно картам Генштаба СССР 1985 года, Большой Гульдурсун стоит на отметке 110,9 м и возвышается над уровнем окружающей поверхности на 12 м, в то



Рис. 4. Канал в окрестности Якке-Парсана. Фото 2021 года.

Расм-4. Якка-Парсон яқинидаги канал. Расм 2021.

Figure 4. Canal in the vicinity of Yakke-Parsan. Photo 2021

время как GE дает оценку его высоты и уровня окружающей поверхности в 100 м. Аналогичные неточности были обнаружены на городищах Аир-кала, Ангка-кала, Актумпек-кала, Базар-кала, Бурлы-кала, Кой-крылган-кала, Тешик-кала, Эрес-кала, зато оценки на Большом Кыркызе и Кургашине совпали с нашими замерами по GPS-навигатору. Поэтому при определении параметра  $h$  следует в первую очередь использовать карты Генштаба и, если только если там нет нужной информации, брать из GE.

Заметим, что поскольку балтийская система высот, принятая в СССР, отличается от WGS-84, то вычислять значения  $h$  нужно по одной и той же карте. Если же на карте Генштаба доступна лишь одна из пары высот, то другую высоту следует взять из GE, переведя ее из WGS в балтийскую систему.

Результаты оценок деградации памятников  $\Delta$  и высоты над уровнем грунтовых вод  $h$  представлены в таблице 3.

№	Название	$C_0$	$C_1$	$\Delta$	$h$
1	Адамли-кала	2	0	2	2.5
2	Айр-кала	2	0	2	1
3	Актумпек	1	0	1	6
4	Ангка-кала	4	3	1	7.05
5	Ат-Сыз-кала	3	0	3	0.5
6	Аяз-1	4	4	0	73
7	Аяз-2	4	4	0	18.75
8	Аяз-3	3	0	3	1.25
9	Базар-кала	1	0	1	8.25
10	Беркут-кала	4	2	2	2.5

№	Название	$C_0$	$C_1$	$\Delta$	$h$
18	Замок-14 (Б.)	4	1	3	0.5
19	Замок-60 (Б)	3	0	3	2.25
20	Кават-кала	2	1	1	3.8
21	Казаклы-яткан	0	0	0	3
22	Кой-крылган-кала	2	0	2	4
23	Кум-кала	0	0	0	4.5
24	Кош-Парсан	1	0	1	0.25
25	Кумбаскан-кала	3	0	3	2.75
26	Кургашин-кала	3	2	1	10.5
27	Кызыл-кала	4	4	0	3

11	Бурлы-кала	2	1	1	9.3	28	Кырк-кыз Большой	1	1	0	5.5
12	Гульдурсун Большой	4	4	0	11	29	Кыркыз Малый	4	2	2	6.75
13	Гульдурсун Малый	4	0	4	0.75	30	Тешик-кала	4	1	3	0.25
14	Джанбас- кала	4	3	1	22.5	31	Топрак-кала	2	0	2	2.5
15	Думан-кала	2	2	0	16.5	32	Уй-кала	3	0	3	2.75
16	Замок-1 (Я-П)	4	0	4	0.5	33	Эрес-кала	0	0	0	1.58
17	Замок-III (Г.)	4	0	4	5	34	Якке-Парсан	3	0	3	2

Таблица 3. Исходные данные для моделирования деградации памятников.

3 жадвал. Ёдгорликларнинг деградациясини моделлаштириш учун дастлабки маълумотлар.  
Table 3. Initial data for damage modeling of monuments.

**Легенда:**  $C_0$  – сохранность памятника на 1969 год,  $C_1$  – сохранность памятника на 2019-2021 г.г.,  $\Delta = C_0 - C_1$ ,  $h$  – высота основания памятника над уровнем грунтовых вод.

**Изоҳ:**  $C_0$  – ёдгорликнинг 1969 йилдаги сақланиши,  $C_1$  – 2019-2021 йиллардаги ёдгорликнинг сақланиши  $\Delta = C_0 - C_1$ ,  $h$  – ёдгорлик пойдеворининг ер ости сувлари сатҳидан баландлиги.

**Legend:**  $C_0$  – condition of the monument in 1969,  $C_1$  – condition of the monument in 2019-2021,  $\Delta = C_0 - C_1$ ,  $h$  – distance between the monument and the groundwater level.

Расчеты показывают, что нет значимой зависимости деградации памятника  $\Delta$  от близости к каналу  $d$ , поэтому этот параметр не приведен в таблице 3. Вероятно, отсутствие зависимости  $\Delta(d)$  говорит о том, что в среднем уровень грунтовых вод не зависит или слабо зависит от близости к каналу. При этом установлена значимая корреляционная зависимость между величиной  $\Delta$  и высотой памятника над уровнем грунтовых вод  $h$ . Увеличение высоты  $h$  приводит к уменьшению скорости разрушения памятника. Этот результат вполне ожидаем, однако теперь можно получить численные характеристики этой зависимости и использовать их в оценках.

Отметим и еще один важный фактор, который связан с геологией. Большинство памятников стоит на такырах, однако некоторые из них, например, Аяз-1, М. Кыркыз расположены на скальном выходе, Джанбас-кала и Кургашин также находятся на возвышении, состоящим из горных пород, которые должны снижать влияние от грунтовых вод или полностью их экранировать.

Моделирование показало, что имеющиеся данные лучше всего описываются эмпирической зависимостью  $\Delta(h) = 3.38 - 0.749 \cdot \sqrt{h}$ , рис 5.

Оба коэффициента и сама модель имеют статистическую значимость при значимости  $\alpha = 0.01$ . Заметим, что эти результаты были получены по данным таблицы 3 при исключении Аяз-калы-1 и трех памятников, у которых  $C_0 = 0$ . Аяз-кала-1 – это единственный памятник, имеющий значение высоты  $h = 73$  м. Высота всех остальных памятников  $h \leq 20$  м, поэтому добавление Аяз-калы-1 будет искажать результат оценки. На такой высоте влияние грунтовых вод должно быть нулевым, а, кроме того, как уже было отмечено выше, памятник расположен на скале.

Причина удаления из выборки трех точек с  $C_0 = 0$  состоит в том, что эти объекты уже были разрушены к 1969 году, поэтому для них будет гарантировано  $\Delta = 0$  вне

зависимости от любых факторов. Принимая это во внимание, мы провели другие расчеты, исключив из рассмотрения памятники с  $C_0 \leq 1$  и  $C_0 \leq 2$ . Смысл этого заключается в том, что памятник, находящийся вблизи грунтовых вод, мог разрушиться сильнее, чем на один класс этой классификации. Однако это не будет отражено в значении в переменной  $\Delta$ , поскольку если памятник изначально имел сохранность равную  $C_0=1$ , то разрушится на 2 или 3 балла классификации он не мог. Если таких памятников будет много, что заранее неизвестно, то они могут существенно снизить влияние объясняющей переменной  $h$ .

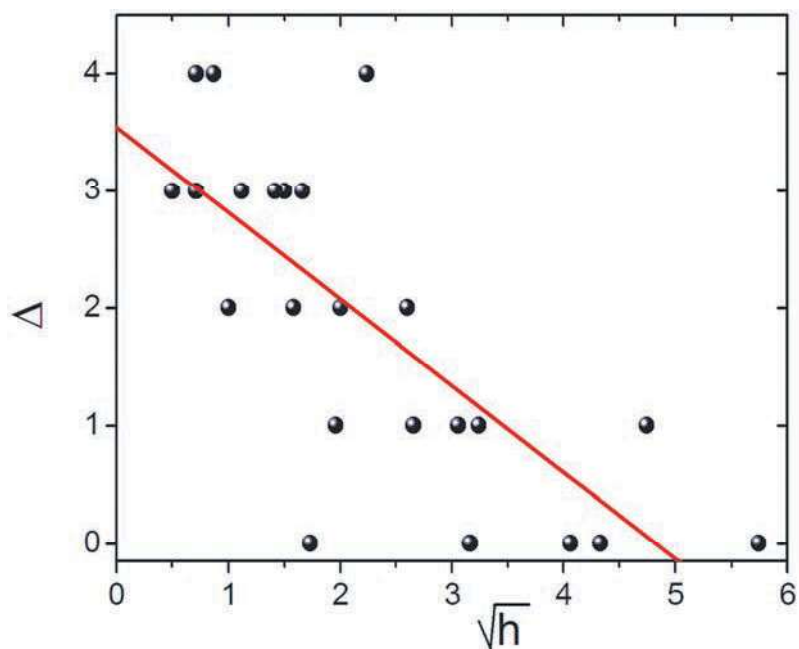


Рис. 5. Зависимость деградации памятника  $\Delta$  от высоты над уровнем грунтовых вод  $h$ . В переменных  $(\Delta, \sqrt{h})$  ее можно представить линейной функцией

Расм. 5. Ёдгорликни  $\Delta$  сув ости сувлариға  $h$  нисбатан деградацияси. Ўзгарувчан холатда  $(\Delta, \sqrt{h})$  уни чизиқли функция орқали намён этиши мумкин

Figure 5. The dependence of the degradation of the monument  $\Delta$  on the height above the groundwater level  $h$ . In variables,  $(\Delta, \sqrt{h})$ , it can be represented as a linear function

Расчеты при другом наборе памятников приводят к примерно одинаковым модельным параметрам  $\Delta(h, C_0 \leq 1) = 3.66 - 0.809 \cdot \sqrt{h}$  и  $\Delta(h, C_0 \leq 2) = 3.85 - 0.812 \cdot \sqrt{h}$ . Устойчивость коэффициентов свидетельствует о надежности полученных оценок. Рассмотрим интерпретацию коэффициентов первой модели  $\Delta(h) = 3.38 - 0.7499 \cdot \sqrt{h}$ .

Коэффициент «3.38» представляет собой «штраф» за поднятие уровня грунтовых вод из-за мелиорации. Его смысл состоит в том, что за полвека (или 50 лет, прошедших с 1969 до 2019 гг.) полностью сохраненный памятник, принадлежащий классу 4, в среднем разрушится до класса 1.

Коэффициент «-0.749» показывает уменьшение скорости разрушения памятника с увеличением его основания от уровня грунтовых вод. Если решить уравнение  $\Delta(h) = 3.38 - 0.7499 \cdot \sqrt{h} = 0$  получим, что при  $h=20.4$  м влияние грунтовых вод на памятник будет полностью нивелировано. При высоте  $h = 10$  м памятник разрушается со скоростью 1 балл классификации за 50 лет, что примерно соответствует 40%–50% длины периметра за столетие. Для консервации памятника нужно сделать такой дренаж, чтобы уровень грунтовых вод был ниже горизонта памятника на 20,5 м.

Полученные модели и численные оценки могут быть полезны при принятии решений в области сохранности культурных объектов. Чтобы законсервировать разрушение памятника, достаточно сделать дренаж, глубину которого можно опередить с помощью предложенных моделей.

## ESTIMATION OF THE RATE AND MODELING OF THE DESTRUCTION OF ARCHAEOLOGICAL SITES OF THE RIGHT-BANK KHOREZM

© 2022. Natalia Antonova<sup>1</sup>, Sergey Bolelov<sup>2</sup>, Mikhail Nikiforov<sup>3</sup>

*Moscow State University named after M. V. Lomonosov<sup>1</sup>,  
State Museum of Oriental Art<sup>2</sup>,  
Moscow State Linguistic University<sup>3</sup>*

---

**Key words:** Khorezm, deterioration of monuments, anthropogenic factors, damage modeling, restoration, conservation.

*By comparing historical and contemporary satellite images, estimates of the deterioration rate of five monumental buildings of the Right-Bank Khorezm were obtained and the approximate dates of their collapse were determined. It has been revealed that the phenomenon of a monument's deterioration is associated with two processes, which can be conditionally called "slow" and "fast".*

*The first is the gradual slow deterioration of a site over the course of centuries under the influence of precipitation, wind, and temperature fluctuations. The other process, the rapid deterioration of a monument, observed over the past few decades is associated with human economic activity, in particular desert reclamation. It has been established that the main factor influencing the rapid deterioration of a monument is its proximity to the groundwater level. The higher the groundwater level is, the more intense is the degradation of the walls.*

*A mathematical model is proposed to describe the process of deterioration of a monument made of clay blocks and raw bricks. A numerical estimate can be obtained to identify how deep the drainage should be to completely mitigate the process of degradation of the monument caused by groundwater. The proposed model can be used to make decisions on the methods of restoration and conservation of the object.*

*It shall be noted that the distance to the groundwater level is very significant although not the only factor influencing the rapid deterioration of the monument.*