

УДК 069.44

© А. М. Харитонов, д-р техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: peerdv@mail.ru

© Е. Г. Панова, д-р геол.-минерал. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
университет, Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: e.panova@spbu.ru

© Н. Н. Шангина, д-р техн. наук, профессор
(Союз Реставраторов Санкт-Петербурга,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: nina.shangina@gmail.com

© Д. С. Сизов, главный инженер проекта
(Институт истории материальной культуры РАН,
ООО «АЖИО», Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: sizov@agiogk.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2022-19-6-92-99

© А. М. Kharitonov, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: peerdv@mail.ru

© Е. G. Panova, Dr. Sci. Geol.-Mineral., Professor
(Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia)

E-mail: e.panova@spbu.ru

© N. N. Shangina, Dr. Sci. Tech., Professor
(Union of Restorers of St. Petersburg,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: nina.shangina@gmail.com

© D. S. Sizov, Chief Engineer of the Project
(Institute of the History of Material Culture
of the Russian Academy of Sciences,
LLC «AGIO», St. Petersburg, Russia)

E-mail: sizov@agiogk.ru

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОНСТРУКЦИЙ ТРИУМФАЛЬНОЙ АРКИ В ПАЛЬМИРЕ

MATERIAL SCIENCE ASSESSMENT OF THE PALMYRA ARCH OF TRIUMPH STRUCTURES

Реставрация Триумфальной Арки Пальмиры, объекта Всемирного наследия Юнеско, требует проведения масштабных комплексных научных исследований, важнейшим элементом которых является анализ системы материалов, использованных при возведении сооружения. Помимо получения недостающей информации о видах, составах и свойствах исторических материалов, для обеспечения необходимого ресурса долговечности конструкций объекта необходимо определить основные деструктивные факторы среды, требующие учета при реставрации. За время существования Арки неоднократно проводились восстановительные работы, поэтому исследование материалов позволяет также выявить, что и как было изменено при поздних ремонтных вмешательствах. В статье рассмотрены обобщенные результаты натурного обследования, а также лабораторных исследований образцов строительных материалов, отобранных из различных конструкций Арки, определены состав и свойства материалов, их подверженность разрушению под действием антропогенных и природных воздействий. Полученные данные позволяют выполнить научно обоснованный выбор системы реставрационных материалов и разработать технологии восстановления и сохранения памятника.

Ключевые слова: Триумфальная Арка, Пальмира, реставрация, инженерно-технологические исследования.

The restoration of Palmyra Arch of Triumph, which is a UNESCO World Heritage Site, requires large-scale comprehensive scientific research, the most important element of which is the analysis of the materials used in the structure erection. In addition to obtaining the missing information about the types, compositions and properties of historical materials, it is necessary to determine the main destructive factors of the environment that must be taken into account during restoration in order to ensure the necessary longevity of the structures of the object. Over the period of the Arch existence, the restoration works have been repeatedly carried out, therefore, the study of materials also allows identifying what and how was changed as a result repair interventions of later time period. The article considers the generalized results of a full-scale survey, as well as laboratory studies of samples of building materials selected from various Arch structures. The composition and properties of materials, their susceptibility to destruction under the influence of anthropogenic and natural influences are determined. The data obtained make it possible to make a scientifically sound choice of a system of restoration materials and develop technologies for the restoration and preservation of the monument.

Keywords: Arch of Triumph, Palmyra, restoration, engineering and technological research.

Введение

Триумфальная Арка Пальмиры (возведена Септимием Северусом в III веке нашей эры) — объект Всемирного наследия Юнеско, серьезно пострадавший в ходе военных действий в 2015 г. (рис. 1). Примерно 40 % конструкций Арки сохранилось, 44 % были обрушены, но могут быть использованы при реставрации, и около 16 % конструкций разрушены полностью [1, 2].

Арка формировала перспективу главной улицы Старого Города, соединяя её с храмом Ваала, и являлась одним из самых примечательных памятников Пальмиры.

Помимо очевидной исторической ценности, Арка имеет символическое значение для Сирийской Арабской Республики, что не оставляет сомнений относительно необходимости её восстановления [3–6]. Первым этапом разработки проекта реставрации, реализуемым в настоящее время российскими специалистами, является проведение комплексных научных исследований объекта, одним из важнейших элементов которых являются материаловедческие изыскания. За время своего существования Арка неоднократно реставрировалась [7], например, в 30-х годах прошлого столетия французским архитектором Робертом Ами (рис. 2), но достоверных данных о системе материалов, использованных при её строительстве, обнаружить не удалось.

Представленное исследование направлено на восполнение недостающих сведений о разновидностях и состоянии материалов, составляющих конструкции Триумфальной Арки, в настоящий момент.

Методы исследования

В период с декабря 2021 г. по ноябрь 2022 г. производились натурные обследования и отбор образцов строительных материалов как непосредственно на Арке, так и на различных объектах Старого города и в окрестностях г. Тадмор. Отобранные образцы исследовались в лабораторных условиях с применением следующих методов:

- стратиграфический анализ слоев материалов;
- петрографический анализ — оценка морфологических признаков структуры с использованием оптической микроскопии;
- рентгенофазовый и элементный анализы образцов;
- оптико-эмиссионный анализ металлов и сплавов.

Особое внимание на данном этапе уделялось установлению вещественного состава материалов, их текущего состояния с точки зрения воздействия процессов эрозии, а также определению оригинальных (первичных) слоев.

Результаты и обсуждения

Основные конструкции Триумфальной Арки составляют блоки из мраморизованного известняка (рис. 3). Реже в конструкции встречаются блоки из мела (рис. 4).

Цвет образцов мраморизованного известняка на свежем сколе колеблется от светло-бежевого до светло-желтого. Порода плотная, достаточно прочная, характеризуется существенной естественной неоднородностью (слоистостью), выделяющейся в присутствии большого количе-



Рис. 1. Триумфальная Арка до (слева) и после (справа) разрушения в 2015 г.



Рис. 2. Роберт Ами с коллегами во время реставрации Триумфальной Арки [8]

ства стилолитовых швов, расположенных в породе на расстоянии 5–10 см друг от друга. Блоки из мела характеризуются значительно более рыхлой структурой и, соответственно, имеют большую степень деструкции вследствие выветривания и механического воздействия.

Сравнительный анализ образцов мраморизованного известняка, составляющего античные блоки, а также блоков, включенных в конструкцию во время реставрации Р. Ами, не позволил обнаружить существенных отличий по вещественному составу и структурным параметрам. В обоих

случаях применялся камень относительно светлого бежевого оттенка с плотной, мелкокозернистой (пелитоморфной) структурой, без различных включений органических остатков (рис. 5).

Для уточнения минерального состава аутентичной горной породы и материала, использованного в ходе реставрации Р. Ами, выполнялся рентгенофазовый анализ проб, подготовленных из отобранных образцов камня. В ходе исследований в составе подавляющего числа проб как аутентичной породы, так и камня, использованного при реставрации, было выявлено содержание только карбоната кальция (CaCO_3 , ~100 %); в редких случаях наблюдалось незначительное содержание диоксида кремния (SiO_2 , ~1 %). Таким образом, минеральный состав мраморизованного известняка античных блоков и блоков времен реставрации Р. Ами очень близок, что указывает на использование природного камня из одного пласта.

Следует отметить, что помимо образцов природного камня из конструкций Арки были отобраны образцы камня из обнаруженных в непосредственной близости от г. Тадмор карьеров (рис. 6). Результаты анализа этих образцов позволяют выявить существенное сходство между мраморизованным известняком, использованным в разное время для возведения и реставрации Арки, а также с материалом, добываемым в настоящее время.

В ходе обследования Арки были обнаружены многочисленные элементы, выполненные из искусственных каменных материалов — растворов и бетонов на основе минеральных вяжущих. Наи-



Рис. 3. Характерные блоки из известняка



Рис. 4. Образец мела, использованного при строительстве Арки

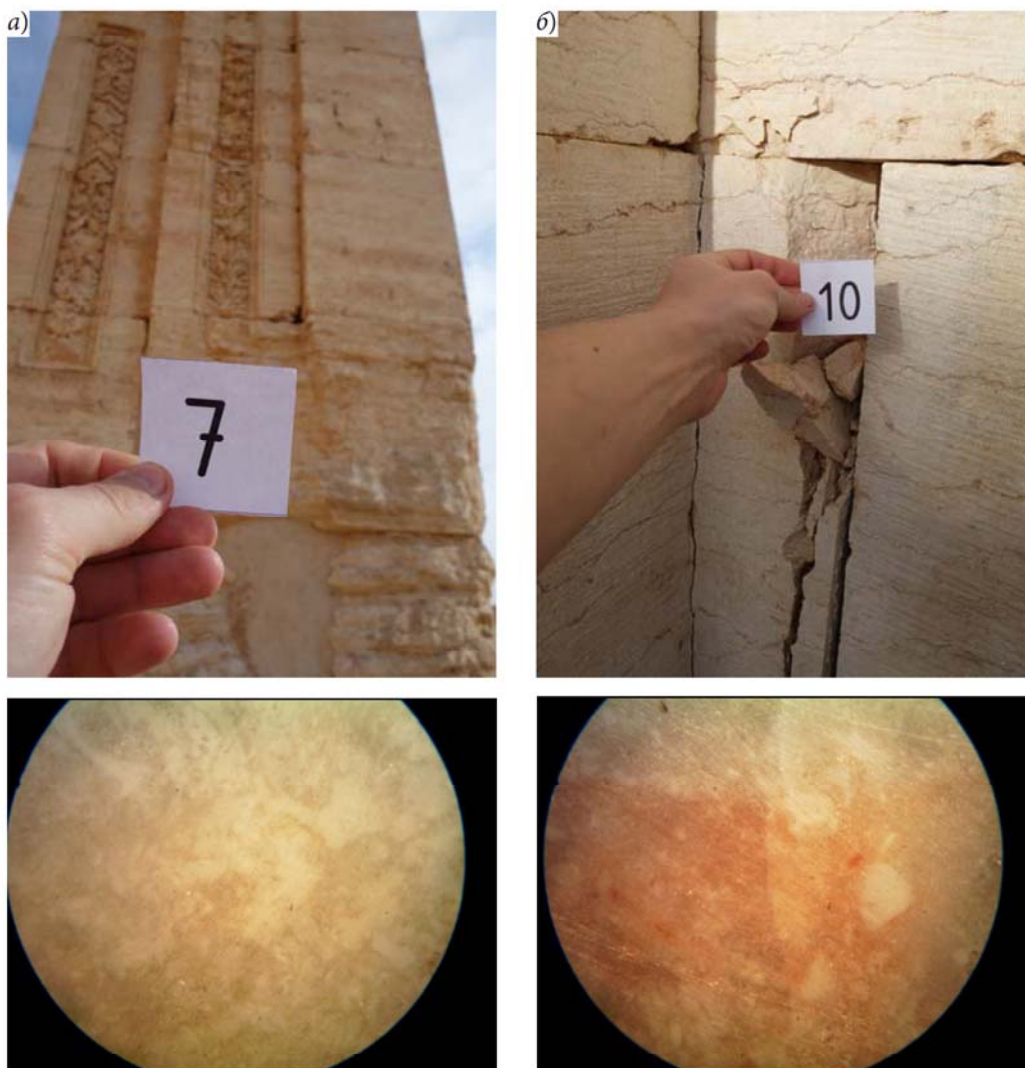


Рис. 5. Блоки из природного камня и их микроструктура при шестидесятикратном увеличении: а — блоки античного периода; б — блоки, использованные при реставрации в 30-х годах XX века

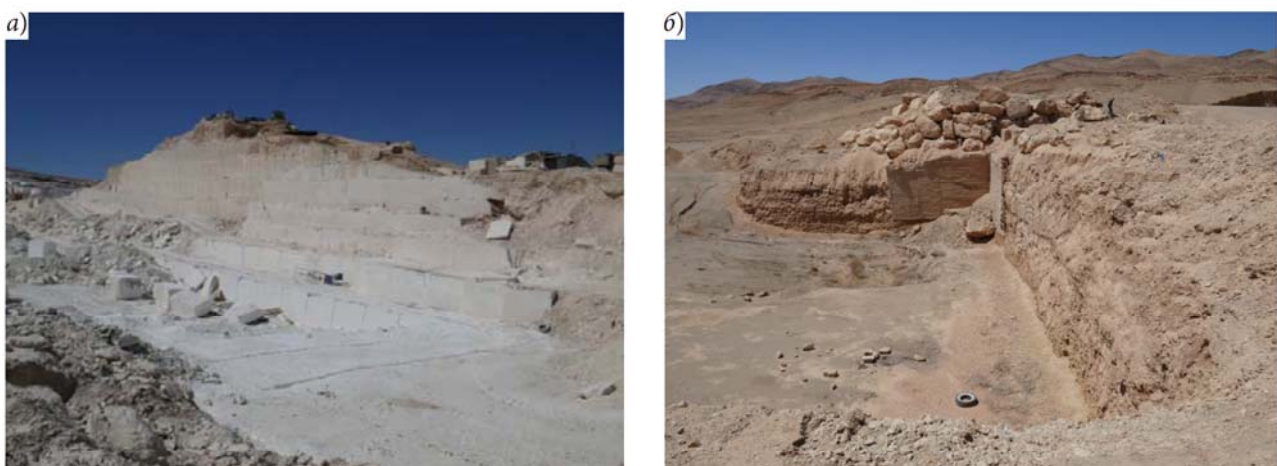


Рис. 6. Карьеры в окрестностях г. Тадмор: а — действующий карьер; б — неразрабатываемый в настоящее время карьер

более массово данный тип материалов присутствует в основаниях пилонов. Помимо этого, ряд блоков времен реставрации Р. Ами состоит из армированного металлом бетонного «сердечника», облицованного мраморизованным известняком. Из бетонов также были выполнены «шипы», использованные при фиксации блоков в специальных соединениях типа «паз-шип» (рис. 7).

При подрыве Арки большая часть бетонных «шипов» была разрушена, их фрагменты повсеместно наблюдаются в пазах блоков. Помимо перечисленных выше случаев, искусственный камень представлен в виде монтажных растворов, присутствующих на поверхностях соприкосновения смежных блоков. Это позволяет утверждать, что в ходе реставрационных работ, выполненных в 30-х годах прошлого столетия, значительная часть конструкций была воссоздана; широко применялся природный и искусственный каменный материал для восполнения крупных утрат.

Технология укрепления баз пилонов Арки, а также подавляющего количества прочих объектов Старого города подразумевала использование не менее двух разных составов: собственно бетона с относительно крупным заполнителем из природного камня и декоративную обмазку коричнево-бежевого цвета, содержащую неорганические пигменты. Обмазка бетона соответствует патинированному от времени мраморизованному известняку (рис. 8).

В зависимости от объема бетонирования наносилось от двух до трех слоев материалов: бетон с относительно крупным заполнителем из природного камня, мелкозернистый бетон с заполнителем из песка, декоративная обмазка. В случае восполнения крупных дефектов последовательно применялись крупно- и мелкозернистые бетоны. При ремонте относительно мелких дефектов использовался только мелкозернистый бетон. Декоративная обмазка являлась финишным слоем во всех случаях.

Следует отметить высокую прочность сцепления искусственных каменных материалов с основанием — природным камнем, что делает невозможным разделение материалов без дополнительного травмирования исторической части конструкции.

Для изготовления крупнозернистых бетонов использовалось цементно-известковое вяжущее с добавкой глиняного теста. Примерное соотношение цемент : известь : заполнитель составляет 1 : (0,3–0,5) : (7,0–7,2). В качестве мелкого заполнителя использовался песок из карбонатных пород и кварцево-полевошпатовый песок. Основная фракция мелкого заполнителя имеет размер 0,315–1,25 мм, диаметр наибольшей крупности соответствует 2,5 мм. В качестве крупного заполнителя применен дробленый мраморизованный известняк фракции величиной 5–20 мм.

Накрывочный ремонтный слой представлен мелкозернистым бетоном светло-серого цвета на



Рис. 7. Блоки, изготовленные с применением растворов и бетонов: а — блоки с бетонным «сердечником»; б — соединения «паз-шип»

основе цементно-известкового вяжущего с соотношением цемент : известь : заполнитель примерно $1 : (0,3-0,5) : (3,8-4,0)$. В качестве заполнителя использовался песок из карбонатных пород и кварцево-полевошпатовый песок. Основная фракция заполнителя — $0,315-0,63$ мм, диаметр наибольшей крупности — $0,8$ мм.

Верхний декоративный слой представлен строительным раствором коричнево-бежевого цвета на основе известково-гипсового вяжущего с примерным соотношением известь : гипс : заполнитель — $1 : (0,2-0,4) : (3,7-3,9)$. В качестве заполнителя использован песок из карбонатных пород с небольшим количеством (до 15 % от объема заполнителя) кварцево-полевошпатового песка. Основная фракция заполнителя — $0,315-0,5$ мм диаметр наибольшей крупности — $0,63$ мм.

Образцы «монтажных растворов», использованных для кладки блоков, представляют собой строительные растворы светло-серого цвета на цементно-известковом вяжущем с соотношением цемент : известь : заполнитель около $1 : (0,3-0,4) : (3,9-4,1)$. Состав данных растворов близок к составу материалов, примененных для бетонирования небольших утрат конструкций. В качестве заполнителя использованы дробленые карбонатные и силикатные породы. Основная фракция заполнителя — $0,315-1,25$ мм, максимальный размер зерен — $3,0$ мм.

Подтверждением вышесказанного являются результаты рентгенофазового анализа: мине-

ральный состав данных растворов представлен в основном карбонатом кальция (CaCO_3 , ~22 %), кремнеземом (SiO_2 , ~41 %), энстатитом ($\text{Mg}_2[\text{Si}_2\text{O}_6]$, ~8 %), полевыми шпатами (санидином $\text{K}(\text{AlSi}_3)\text{O}_8$, ~3 % и альбитом $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$, ~10 %), а также портландитом ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, ~3 %). В составе раствора также выявлено содержание клинкерных минералов алита и белита (C_3S и C_2S , ~10 %).

При обследовании Арки также был установлен факт применения металлических изделий, выполняющих роль «шипов» в соединениях блоков типа «паз-шип», либо арматуры в блоках времен реставрации Р. Ами. Металлические изделия, использованные для соединения блоков способом «паз-шип», закреплялись в блоках путем заливки зазора между природным камнем и «шипом» расплавленным свинцом (рис. 9).

Для определения вещественного состава металлических «шипов», предназначенных для скрепления блоков, был выполнен оптико-эмиссионный анализ.

По химическому составу образцы металлических элементов существенно разнородны. Часть образцов можно соотнести с современными низкоуглеродистыми сталями марок Ст0 и Ст3. Другие элементы выполнены из черного металла, близкого по составу к литейному чугуна марки Л1. Один из образцов металлического «шипа» по химическому составу представляет собой техническое железо, время происхождения которого предположительно относится к достаточно раннему периоду.

Важно отметить, что элементы из чугуна характеризуются значительно меньшей степенью поражения коррозией по сравнению с деталями из стали и железа.

В части натурного обследования состояния конструкций Арки можно отметить наличие дефектов природного и искусственного камня, образовавшихся под воздействием абиотических факторов среды, в особенности механического выветривания (эрозии) — наиболее распространенного типа разрушения в условиях полупустынного климата. В наибольшей степени затронуты выветриванием нижние части пилонов, сложенные из природного камня. Вероятно, широкое применение искусственных каменных материалов при реставрации данной части Арки



Рис. 8. Бетонный блок с пигментированной декоративной обмазкой

было обусловлено высокой степенью эрозии блоков из природного камня.

В результате механических воздействий, в том числе и взрыва в 2015 г., часть блоков из природного камня разрушается по зонам естественной неоднородности — стилолитовым швам. Размер открытых трещин может составлять от долей миллиметра до нескольких миллиметров; часть блоков полностью разделена на отдельные части. Также отмечены множественные утраты камня в блоках. Объем утрат материала составляет от нескольких кубических сантиметров до нескольких кубических дециметров.

К сожалению, значительные утраты имеются и на участках блоков из мраморизованного известняка с резным декором. В ряде случаев пластика камня пострадала весьма существенно (рис. 10).

Существенно повреждены и участки конструкций из искусственного камня. Трещины распространяются от основания — крупнозернистого бетона, а также локально, по декоративно известково-гипсовой обмазке. Ввиду широкого применения при поздних реставрациях Арки бетонов, отличающихся от природного камня более высокой прочностью, в местах сопряжения разнородных материалов имеются трещины с раскрытием 1 см и более.

На ряде блоков, которые располагались в зонах одновременного замкания и концентрации почвенной взвеси, наблюдаются многолетние застарелые атмосферо-почвенные загрязнения. Также в ходе обследования Арки были отме-

чены разнообразные формы заселения блоков биотой различной природы. Присутствуют биопленки на поверхности природного и искусственного камня, имеются колонии лишайников, а также произрастают высшие растения, которые относятся к факторам биодеструкции сооружения.

Ряд участков баз пилонов имеет следы ино-родных окрасок, выполненных по мраморизованному известняку лакокрасочными материалами на основе современных синтетических пленкообразователей.

Выводы

В работе рассмотрены результаты комплексных материаловедческих исследований Триумфальной Арки Пальмиры, позволившие установить наличие большого многообразия использованных на объекте материалов. К оригинальным материалам можно отнести природный камень — мраморизованный известняк и, вероятно, часть металлических элементов, выполненных из технического железа. При реставрации Арки в 30-х годах прошлого века активно применялись искусственные каменные материалы на воздушных и гидравлических вяжущих веществах, декоративные обмазки с пигментами, а также железоуглеродистые сплавы. Искусственные и природные каменные материалы были объединены в единые конструкции, и многие из них сейчас находятся в удовлетворительном состоянии. Учитывая невозможность безтравматического отделения ремонтных составов от природного камня, представляется целесо-



Рис. 9. Металлический «шип», зафиксированный свинцом



Рис. 10. Поврежденный при взрыве блок с резным декором

образным использование подобных сохранившихся элементов при реставрации.

Основные дефекты конструкций, помимо воздействия взрыва, обусловлены эрозией под действием естественных абиотических факторов среды и биопоражениями. Требуется разработка специальных мероприятий, способных увеличить эксплуатационный ресурс материалов конструкций в условиях пустыни.

Установлено существенное сходство между мраморизованным известняком, использованным в разное время для возведения и реставрации Арки, с природным камнем, добываемым в настоящее время в окрестностях г. Тадмор, что позволяет признать его пригодным для использования в предстоящих реставрационных работах.

Библиографический список

1. Итоги первого этапа работ по реставрации Триумфальной Арки Пальмиры. URL: <https://www.archeo.ru/struktura-1/otdel-ohrannoi-arheologii/novosti/itogi-pervogo-etapa-rabot-po-restavracii-triumfalnoi-arki-palmiry/itogi-pervogo-etapa-rabot-po-restavracii-triumfalnoi-arki-palmiry> (дата обращения: 02.11.2022).
2. Белаиш Т. А., Альдреби З. А. Анализ повреждений памятников архитектуры Сирии, полученных в результате землетрясений и военных действий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016. № 5. С. 58–63.
3. Возрождение Триумфальной Арки Пальмиры. URL: <https://www.rgo.ru/en/article/revival-palmyras-triumphal-arch> (дата обращения: 02.11.2022).
4. Charles Gates. *Ancient Cities: The Archaeology of Urban Life in the Ancient Near East and Egypt, Greece and Rome*. Taylor & Francis, 2011. P. 406.
5. Голобородский М. В. К вопросу о реставрации Триумфальной Арки в Пальмире // Строительство и архитектура. 2022. Т. 10. № 2. С. 46–50.
6. Соловьева Н. Ф., Соловьев С. Л., Блохин Е. К., Казаков Э. Э. Пальмира во времени и пространстве // Прошлое человечества в трудах петербургских археологов на рубеже тысячелетий (К 100-летию создания российской академической археологии): Коллективная монография. Санкт-Петербург: Центр «Петербургское востоковедение», 2019. С. 271–286.
7. Михаловский К., Дзевановский А. Пальмира. Варшава: Издательство «Аркады», 1968. 130 с.
8. Archaeological missions. URL: <https://archeologie.culture.gouv.fr/palmyre/en/archaeological-missions> (дата обращения: 02.11.2022).

References

1. *Itogi pervogo etapa rabot po restavratsii Triumfal'noy Arki Pal'miry* [The results of the first stage of the restoration of the Palmyra Arch of Triumph]. Available at: <https://www.archeo.ru/struktura-1/otdel-ohrannoi-arheologii/novosti/itogi-pervogo-etapa-rabot-po-restavracii-triumfalnoi-arki-palmiry/itogi-pervogo-etapa-rabot-po-restavracii-triumfalnoi-arki-palmiry> (accessed: 02.11.2022).
2. Belash T. A., Al'drebi Z. A. *Analiz povrezhdeniy pamyatnikov arkhitektury Sirii, poluchennykh v rezul'tate zemletryaseniya i voennykh deystviy* [Analysis of damage to Syrian architectural monuments caused by earthquakes and military actions]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Earthquake Engineering. Safety of Structures*, 2016, no. 5, pp. 58–63.
3. *Vozrozhdenie Triumfal'noy Arki Pal'miry* [Revival of the Triumphal Arch of Palmyra]. Available at: <https://www.rgo.ru/en/article/revival-palmyras-triumphal-arch> (accessed: 02.11.2022).
4. Charles Gates. *Ancient Cities*. In: *The Archaeology of Urban Life in the Ancient Middle East and Egypt, Greece and Rome*. Taylor & Francis Publ., 2011, 406 p.
5. Goloborodskiy M. V. *K voprosu o restavratsii triumfal'noy arki v Pal'mire* [On the restoration of the triumphal arch in Palmyra]. *Stroitel'stvo i arkhitektura – Construction and Architecture*, 2022, vol. 10, no. 2, pp. 46–50.
6. Solov'eva N. F., Solov'ev S. L., Blokhin E. K., Kazakov E. E. *Pal'mira vo vremeni i prostranstve* [Palmyra in time and space]. *Kollektivnaya monografiya «Proshloe chelovechestva v trudakh peterburgskikh arkheologov na rubezhe tysyacheletiy (K 100-letiyu sozdaniya rossiyskoy akademicheskoy arkheologii)»* [In: Collective monograph “The past of mankind in works of the Petersburg archaeologists on a boundary of millennia (To the 100-th anniversary of creation of the Russian academic archeology)”]. St. Petersburg, Tsentr «Peterburgskoe vostokovedenie», 2019, pp. 271–286.
7. Mikhlovskiy K., Dzevanovskiy A. *Pal'mira* [Palmyra]. Varshava, Izdatel'stvo Arkady Publ., 1968, 130 p.
8. *Archaeological missions*. Available at: <https://archeologie.culture.gouv.fr/palmyre/en/archaeological-missions> (accessed: 02.11.2022).