УДК 4:902/904:543.427 https://doi.org/10.24852/2587-6112.2026.5.230.243

О РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОМ АНАЛИЗЕ КРАСОК НА ФРЕСКЕ ИЗ ЕРКУРГАНА (УЗБЕКИСТАН)

©2026 г. М.А. Реутова, И.А. Шаронов, А.К. Иванов, А.С. Алибеков

Представлены результаты элементного анализа разрозненных фрагментов монументальной живописи из древнего городища Еркурган, расположенного в Кашкадарьинской области Узбекистана. Часть фрагментов, найденная в раскопе городского храма, датированного III-IV вв. н.э., по итогам осмотра может быть идентифицирована как фрагменты фрески. фрагменты, найденные в раскопе дворцового комплекса, датированного III в. н.э., идентифицированы как фрагменты живописи на лёссовой основе, сделанные в типичной для Центральной Азии технике живописи на сухой штукатурке. Для уточнения идентификации храмовых фрагментов определен элементный состав красок красного, желтого, белого и черного цвета на четырех фрагментах возможной фрески. Для сравнения сделан анализ красок на семи фрагментах живописи из дворцового комплекса. Содержание кальция на поверхности красочного слоя возможной фрески существенно больше содержания кальция на поверхности живописи, нанесенной на сухую штукатурку. Это указывает на наличие кальцитной пленки на поверхности образцов из храма. Это признак того, что живопись храма сделана красками по сырой известковой штукатурке, то есть действительно является фреской. Элементный анализ позволил определить минеральные пигменты, из которых были сделаны краски. Для красной и желтой красок были использованы железосодержащие минералы охра или гематит, для белой краски – кальцит или гипс. Для анализа использовался энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный портативный спектрометр vanta element.

Ключевые слова: археология, монументальная живопись, городище Еркурган, дворцовый комплекс (III в. н.э.), городской храм (III-IV в. н.э.), фреска, минеральные краски, элементный состав, рентгенофлуоресцентный анализ, портативный спектрометр, Узбекистан

ON THE X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS OF PAINTS ON THE ERKURGAN FRESCO (UZBEKISTAN)

M.A. Reutova, I.A. Sharonov, A.K. Ivanov, A.S. Alibekov

The paper deals with the results of an elemental analysis of scattered fragments of monumental painting from the ancient fortified settlement of Erkurgan in the Kashkadarya region of Uzbekistan are presented. A part of the fragments found in the excavation of the city temple, dated from the 3rd-4th centuries AD, can be identified as fragments of a fresco based on the results of the inspection. The fragments found in the excavation of the palace complex, dated to the 3rd century AD, have been identified as fragments of loess-based paintings made using the dry plaster painting technique typical for Central Asia. To confirm the identification of the temple fragments, the elemental composition of red, yellow, white and black paints was determined on four fragments of a potential fresco. For comparison, an analysis was also conducted on pigments from seven painting fragments found in the palace complex. The calcium content on the surface of the paint layer of the potential fresco is significantly higher than the calcium content on the surface of the painting applied to dry plaster. This indicates the presence of a calcite layer on the surface of the samples from the temple. This is a sign that the painting of the temple complex was done with paints on wet lime plaster, i.e. it is indeed a fresco. Elemental analysis made it possible to identify the mineral pigments from which the paints were made. Iron-containing minerals such as ochre or hematite were used for red and yellow paints, and calcite or gypsum – for white one. The energy-dispersive X-ray fluorescence portable spectrometer vanta element was used for analysis.

Keywords: archaeology, monumental painting, Erkurgan fortified settlement, palace complex (3rd century AD), city temple (3rd-4th centuries AD), fresco, mineral paints, elemental composition, x-ray fluorescence analysis, portable xrf-spectrometer, Uzbekistan

Введение

На территории Узбекистана есть большое количество археологических памятников. Одним из значимых является городище Еркурган, находящееся на расстоянии около 10 км к северо-западу от города Карши. Впер-

вые развалины крупного древнего города в Каршинском оазисе были кратко описаны ещё в 1916 году членами Туркестанского кружка любителей археологии Л.А. Зиминым и И. Кастанье (Кабанов, 1977). В описании узнавались остатки Еркургана, бывшего крупнейшим городом юга древней Согдианы и первой столицей Нахшаба (Каршинский оазис) (Сулейманов, 2000; 2004). Ученые предполагают, что Еркурган – остатки одного из двух городов, упоминавшихся при описании маршрута похода Александра Македонского из Бактрии в Самарканд в 329–328 гг. до н.э. (Исамиддинов, Сулейманов, 1984). Результаты масштабных археологических раскопок, начатых в 1971 году, показали, что город на месте Еркургана возник в VIII–VII вв. до н.э., просуществовал до VI в. н.э. и был заброшен после разгрома тюрками и персами государства эфталитов.

За время многолетних раскопок на городище в шести крупных раскопах были открыты остатки дворцового комплекса, городского храма и других сооружений, построенных в разное время (Кабанов, 1977). Дворцовый комплекс датируется археологами III в. н.э., а городской храм – III–IV вв. н.э. (Исамиддинов, Сулейманов, 1984; Сулейманов, 2000).

При раскопках городского храма и дворцового комплекса были обнаружены разрозненные фрагменты монументальной живописи. При их визуальном осмотре было замечено, что фрагменты, найденные рядом с храмом, заметно отличались от тех, что были обнаружены в дворцовом комплексе. У первых красочный слой гладкий, твердый и несмываемый, тогда как у вторых он шероховатый и легко крошащийся, что характерно для живописи по сухому лёссу или гипсовой штукатурке (alsecco). Визуальное и тактильное обследование кусочков живописи, найденных при раскопках храма позволило археологам считать их фрагментами фрески (affresco, buon fresco). Следует отметить, что фрески – это вид древней монументальной живописи, нехарактерный для Узбекистана, и наши археологи с ними еще не сталкивались.

Следует кратко сказать о некоторых техниках монументальной живописи, которые использовались древними художниками.

Alsecco (*латин.* in arido) – это техника живописи по сухой штукатурке, например, по лессовой или гипсовой. В качестве красок могли использоваться пигменты, получаемые обычно из цветообразующих минералов. Для сцепления краски со штукатуркой порошок краски смешивался со связующими веществами, например, с различными природными смолами, пчелиным воском, маслами и т.п.

Buon fresco (*латин.* in udo) – это так называемая "чистая фреска", фресковая живопись, выполняемая водными растворами пигментов по свежей, влажной штукатурке на основе гашеной извести (гидроксида кальция $Ca(OH)_2$). После нанесения краски на штукатурку слой краски пропитывается насыщенным известковым раствором, который обволакивает зерна краски и выступает на поверхность красочного слоя. При высыхании этого раствора гидроокись кальция реагирует с углекислым газом CO_2 воздуха и превращается в кальцит $CaCO_3$. В результате краска прочно пристает к штукатурке, а на поверхности красочного слоя образуется прозрачная кальцитная пленка. Это обеспечивало прочность и долговечность фресок даже без использования связующих компонентов.

Развитием техники "чистой фрески" являются приемы, в которых кроме чистой извести для изготовления левкаса и красок стали применяться такие органические связующие как яичный желток и белок, казеин, животные и растительные клеи, растительные масла и т.п.

Информацию о техниках древней монументальной живописи, о минеральных пигментах и связующих, применяемых при изготовлении древних штукатурок и красок, можно найти в различной литературе, например, (Крестов, 1941; Виннер, 1948; Historical Painting Techniques, 1995; Косолапов, Маршак, 1999; Киплик, 2002; Алексеев-Алюрви, 2004; Лукьянова, 2012; Zuleika, 2021; Никитин, 2021).

При изучении археологического материала идентификация и классификация находок вначале обычно делается по типологическим макроскопическим признакам. Это помогает во многих случаях, но выводы, которые ученые могут сделать, будут ограничены. Для более полного понимания природы находок следует полагаться также на физико-химические методы анализа, позволяющие определить, какие материалы и технологии использовались древними мастерами при создании археологических артефактов. Среди используемых археологами физических методов

анализа следует упомянуть рентгенофлуоресцентный и рентгенодифракционный анализ, рамановскую и инфракрасную спектроскопию, электронную микроскопию и др. Исследованию такими методами древней живописи, посвящено много научных публикаций, например, (Giuseppe, 2013; Bayerova, 2016; Janssens, 2016; Holclajtner-Antunović, 2016; Храмченкова, 2019; Khramchenkova, 2019; Реутова, 2019; Лобода, 2021; Tomomi Tamura, 2021; Cechák, 2022; Шаронов, 2024; Cortea, 2024).

Учитывая историческую ценность уникальных археологических артефактов, их исследование надо делать неразрушающими методами анализа. Наиболее популярным и доступным для археологов является энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ, позволяющий с помощью портативных спектрометров проводить элементный анализ веществ без разрушения исследуемых объектов не только в лабораториях, но и в условиях in situ.

Напомним, что найденные при раскопках городского храма фрагменты росписи по мнению самаркандских археологов могут быть частью фрески, ранее не встречавшейся на территории Узбекистана. Поэтому интересно их изучение с помощью физических методов анализа.

Целью нашего исследования является количественный элементный анализ красок на фрагментах монументальной живописи, найденных на городище Еркурган, с помощью энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного портативного спектрометра Vanta Element Самаркандского института археологии.

Материалы и методы исследования

В качестве основных объектов исследования были выбраны 4 разрозненных фрагмента полихромной живописи (рис. 1), взятые из земли рядом с остатками городского храма и являющиеся по мнению археологов Самаркандского института археологии фрагментами фрески (affresco, buon fresco). Также для сравнения были взяты для анализа 7 разрозненных фрагментов полихромной живописи из дворцового комплекса – 3 фрагмента с краской красного цвета, 2 – желтого цвета и 2 – белого цвета. Эти фрагменты принадлежали живописи, сделанной на сухой штукатурке, то есть были сделаны в технике alsecco, типичной для Центральной Азии.

Анализ фрагментов фрески был сделан для четырёх цветов краски:

красный цвет на анализируемых участках 1.1, 1.2, 2.1, 3.1;

жёлтый – на 4.1, 4.2, 4.3;

белый – на 2.3, 2.4, 3.2, 3.3;

черный – на 1.3, 1.4, 2.2, 3.4.

На белой краске выделяются следы загрязнения от неполностью счищенной земли, прочно налипшей на фрагменты живописи, находившиеся многие века в земле. Поэтому для белой краски анализ был сделан на чистых (2.3 и 3.3) и загрязненных (2.4 и 3.2) участках.

Диаметр выходного коллиматора спектрометра Vanta Element 10 мм, поэтому возбуждающее рентгеновское излучение облучает участок на поверхности фрагмента диаметром не менее 10 мм. Таким образом, будем иметь дело с значениями концентраций всех химических элементов, находящихся на этом участке, а не с точечными значениями. Для оценки размеров фрагментов и их сопоставления с размерами анализируемых участков фотографии фрагментов сделаны на миллиметровой бумаге (рис. 1).

Для проведения исследований выбран метод рентгенофлуоресцентного анализа. Он основан на том, что при воздействии рентгеновского излучения на атомы вещества возникает вторичное излучение, в энергетическом спектре которого появляются линии, индивидуальные для каждого химического элемента и образующие уникальный характеристический спектр. При облучении вещества со сложным составом в характеристическом спектре будут линии от элементов, обнаруженных в исследуемом веществе. Анализ энергий и интенсивностей этих спектральных линий с помощью программного обеспечения спектрометра позволяет определять содержание химических элементов в веществе. Надо отметить, что каждый химический элемент даёт свой характеристический спектр независимо от того, возбуждается атом элемента в свободном состоянии или в составе химического соединения.

Для археологов основными достоинствами этого метода определения элементного состава по сравнению с другими являются простота интерпретации характеристического спектра и возможность анализа уникальных предметов материального культурного наследия без их разрушения.

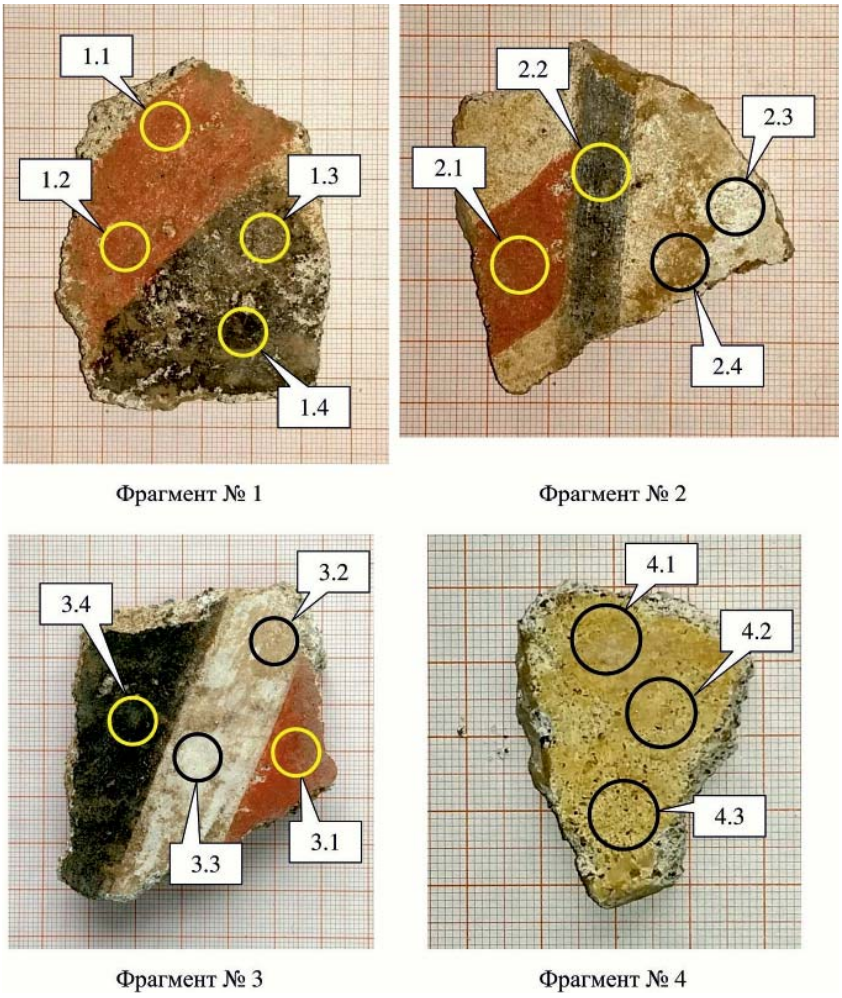


Рис. 1. Фрагменты фрески из Еркургана с указанием анализируемых участков
Fig. 1. Fragments of the fresco from Erkurgan with indication of the analysed sites

Основы рентгенофлуоресцентного анализа и применение его в археологии подробно описаны в различных руководствах и научных статьях, например, в (Mantler, 2000; Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, 2006).

Для проведения исследований нами был использован ручной спектрометр Vanta Element-S, имеющий следующие основные характеристики:

- источник возбуждения - рентгеновская трубка с мощностью до 4 Вт с серебряным анодом и анодным напряжением до 50 кВ;

- детектор – кремниевый дрейфовый детектор SDD с энергетическим разрешением <135 эВ для спектральной линии Mn Kα (5.9 кэВ) и скоростью счета импульсов 100000 имп/с;

- диапазон измерений – 0.001% – 100%.

Измерения выполнялись с помощью аналитического приложения "Геохимия" в режиме Geochem_3-Beam. Анализ выполнялся в лабораторном помещении Самаркандского института археологии при комнатной температуре в три последовательных этапа:

Beam 1 – анодное напряжение 40 кВ, время облучения 60 с, определяются Ag, As, Au, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Se, Sn, Sr, Th, Ti, V, W, Y, Zn, Zr;

Beam 2 - анодное напряжение 10 кВ, время облучения 30 с, определяются Al, Ca, Cl, Mg, Mn, P, S, Si, Ti;

Beam 3 - анодное напряжение 50 кВ, время облучения 20 с, определяются Ag, Ba, Cd, Ce, La, Nd, Pr, Sb, Sn.

Надо сказать, что ручные рентгенофлуоресцентные спектрометры подобного класса изначально предназначались для использования в промышленности, геологоразведке, экологическом мониторинге и др. В дальнейшем, несмотря на некоторые недостатки таких спектрометров (например, проблема с определением легких элементов), они стали широко

использоваться археологами. Это связано с тем, что при изучении археологических артефактов очень важна возможность использования быстрого неразрушающего метода анализа не только в лабораторных условиях, но и в условиях in situ.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты анализа красок красного, жёлтого, белого и черного цветов на обследованных фрагментах фрески из городища Еркурган приведены в таблицах 1–4, в которых показан элементный состав красок, определенный на аналитических участках. Во всех таблицах С(эл) показывает концентрацию химического элемента, σ – стандартное отклонение. В проанализированных образцах было определено 27 химических элемента – ^{24}Mg, ^{27}Al, ^{28}Si, ^{31}P, ^{32}S, ^{35}Cl, ^{40}Ca, ^{48}Ti, ^{52}Cr, ^{55}Mn, ^{56}Fe, ^{59}Ni, ^{59}Co, ^{64}Cu, ^{65}Zn, ^{75}As, ^{85}Rb, ^{88}Sr, ^{89}Y, ^{91}Zr, ^{93}Nb, ^{112}Cd, ^{119}Sn, ^{137}Ba, ^{184}W, ^{201}Hg, ^{207}Pb. Часть химических элементов обнаружена в очень низких концентрациях (сотые доли процента или менее), поэтому значения концентрации в таблицах приведены как в процентах, так и в единицах ppm, которые применяются для оценки малых концентраций, 1 ppm=0.0001%, для весовых концентраций 1 ppm соответствует 1 мг/кг.

Таблица 1. Элементный состав красной краски на фрагментах фрески из Еркургана (% и ppm)
Table 1. Elemental composition of red paint on fragments of the fresco from Erkurgan (% and ppm)

Хим.	1.1		1.2		2.1		3.1	
элем.	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ
Al	1.49%	0.13	1.70%	0.14	2.22%	0.14	1.27%	0.13
As	18	4	14	4	8	4	12	4
Ba	290	110	340	100	380	110	280	110
Ca	18.5%	0.11	20.3%	0.12	21.3%	0.12	24.6%	0.13
Cl	6.34%	0.05	560	130	3370	140	2880	130
Cr	134	55	140	58	151	54	110	54
Cu	61	10	54	10	50	9	42	9
Fe	1.95%	0.02	1.80%	0.03	1.97%	0.02	1.49%	0.02
Hg	10	7	10	8	10	7	9	7
Mn	303	43	339	47	248	40	312	44
Ni	35	11	30	11	31	10	32	11
P	480	130	690	150	310	140	1340	150
Pb	18	5	21	5	17	5	13	4
Rb	35	3	33	3	38	3	41	3
S	1850	110	1910	120	1.34%	0.02	4840	130
Si	5.55%	0.08	6.21%	0.09	7.02%	0.09	3.98%	0.07
Sn	26	23	32	24	34	23		
Sr	2429	23	2544	26	3019	27	2699	26
Ti	1950	300	1940	310	1530	280	960	280
W	33	19	36	20	37	19	34	19
Zn	51	8	53	8	41	7	54	8
Zr	36	6	28	7	15	7	20	6

Таблица 2. Элементный состав желтой краски на фрагментах фрески из Еркургана (% и ppm)
Table 2. Elemental composition of yellow paint on fragments of the fresco from Erkurgan (% and ppm)

Хим.	4.1		4.2		4.3	
элем.	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ
Al	1.09%	0.12	1.06%	0.12	1.30%	0.12
As	119	6	76	5	71	5
Ba	410	120	390	120	360	110
Bi	46	25				
Ca	22.9%	0.31	22.9%	0.31	23.6%	0.31
Cd			25	18	19	18

Cl	1660	120	1790	120	1590	120
Cr	139	50	133	50	121	50
Cu	45	9	41	8	37	8
Fe	2.34%	0.04	1.41%	0.03	1.26%	0.03
Hg	11	7	11	7	7	7
Mg	1.43%	0.89	1.56%	0.91	1.50%	0.88
Mn	310	40	291	40	310	41
Ni	41	10	35	10	32	10
P	1020	130	1330	140	3460	170
Pb	18	5	17	4	14	4
Rb	38	3	37	3	49	3
S	4150	130	3490	120	5240	150
Si	3.21%	0.08	3.70%	0.09	4.11%	0.09
Sn	39	22	39	21		
Sr	5002	84	3560	61	2525	43
Ti	1190	260	1000	250	830	250
W	30	18	35	18	31	17
Zn	90	9	74	8	82	8
Zr			28	7	30	6

Таблица 3. Элементный состав белой краски на фрагментах фрески и глиняной подложки живописи из Еркургана (% и ppm)
Table 3. Elemental composition of white paint on fragments of fresco and clay bed of painting from Erkurgan (% and ppm)

хим.	2.3		3.3		2.4		3.2		Глина	
элем.	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ	С(эл)	3σ
Al	7000	1200	2300	1100	1.76%	0.13	1.50%	0.13	1.52%	0.14
Ba	360	120	270	120	240	110	310	120	390	110
Ca	29.6%	0.14	29.8%	0.14	23.5%	0.13	26.8%	0.13	22.8%	0.13
Cd			20	19	21	19				
Cl	1.74%	0.02	2930	110	2730	140	1720	120	470	120
Co	50	28	61	23			33	31	47	36
Cr	123	55	121	53	127	54	107	53	127	56
Cu	31	9	29	8	37	9	31	9	36	9
Fe	3810	100	2549	80	7630	140	5900	120	7600	140
Hg	12	7	9	7	11	7	12	7	13	8
Mn	176	39	157	36	286	42	273	41	296	44
Ni	28	10	25	10	40	11	34	10	38	11
P	480	130	490	130	740	140	610	140	280	140
Pb	15	4	11	4	14	4	15	4	17	5
Rb	40	3	31	3	33	3	37	3	76	3
S	6450	130	4910	110	1.18%	0.02	1.56%	0.02	1790	100
Si	2.17%	0.05	8230	380	5.32%	0.08	4.53%	0.07	7.24%	0.09
Sn	32	23	21	22	23	23	22	22		
Sr	2571	24	3741	33	2684	25	2901	26	1851	19
Ti	700	260	680	260	1240	280	1370	280	1350	300
W	26	19	29	18	37	19	32	18	41	19
Zn	39	7	46	7	41	7	48	7	37	7
Zr	21	6	10	7	17	6	27	6	42	6

Таблица 4. Элементный состав черной краски на фрагментах фрески из Еркургана (% и ppm)
Table 4. Elemental composition of black paint on fragments of the fresco from Erkurgan (% and ppm)

хим.	1.3		1.4		2.2		3.4	
элем.	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ
Al	2.01%	0.14	1.51%	0.14	1.02%	0.12	1.13%	0.12
As	12	4	10	4	7	4	8	3
Ba	300	110	310	100	280	110	520	120
Bi					21	21	29	24
Ca	22.8%	0.13	23.8%	0.14	26.8%	0.13	26.6%	0.13
Cd							28	19
Cl	540	120	960	130	3380	120	2120	120
Co			Co		33	28	66	28
Cr	130	55	137	58	113	52	145	52
Cu	66	10	66	11	36	9	46	9
Fe	9140	160	7060	140	4880	110	4540	100
Hg	12	7	13	8	10	7	8	7
Mn	384	46	398	49	250	39	269	40
Ni	34	10	41	11	35	10	33	10
P	1040	150	900	150	460	130	1390	140
Pb	18	4	22	5	17	4	13	4
Rb	43	3	44	3	47	3	30	3
S	3560	130	2330	120	9560	150	3990	120
Si	6.71%	0.09	5.34%	0.09	3.15%	0.06	3.00%	0.06
Sn	39	23	23	24	22	22	25	22
Sr	2357	23	2542	25	2521	23	4051	34
Ti	1650	300	1620	300	870	260	860	260
W	33	19	35	20	38	18	31	18
Zn	54	8	47	8	32	7	52	7
Zr	35	6	35	7	18	6	10	7

Дополнительно к анализу красок фрески был сделан элементный анализ семи разрозненных кусочков живописи с красной, желтой (табл. 5) и белой (табл. 6) красками, найденными в раскопе дворцового комплекса. Это были фрагменты живописи, явно выполненные в технике alsecco. Они интересны для сравнения с фрагментами фрески.

Перед обсуждением того, какую информацию нам дали эти результаты, кратко скажем о цветообразующих минералах, использованных древними художниками Центральной

Таблица 5. Элементный состав красной и желтой красок на фрагментах настенной живописи "alsecco" из дворцового комплекса Еркургана (% и ppm)
Table 5. Elemental composition of red and yellow paints on fragments of the "alsecco" wall paintings from the Erkurgan palace complex (% and ppm)

Образец	5 красная		6 красная		9 красная		7 желтая		8 желтая	
Хим. элем.	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ
Al	2.53%	0.15	3.26%	0.16	2.17%	0.16	2.12%	0.15	7776	1323
As	20	5	29	6	11	5	47	6	14	6
Ba	251	80	271	82	177	73	139	86	200	84

Ca	6.99%	0.07	5.44%	0.05	3.99%	0.04	15.0%	0.12	18.7%	0.15
Cd							40	27		
Cl	5350	190	4.93%	0.06	4.07%	0.05	6840	220		
Cr			91	66	103	65	96	76		
Cu	46	12	49	13	43	13	32	12	30	13
Fe	3.28%	0.04	2.91%	0.04	3.22%	0.05	8660	210	4020	150
Hg							11	10		
Mn	323	55	460	62	363	58	217	57	107	52
Nb	8	4	10	4	8	4				
Ni	49	15	59	16	54	16	25	14	25	15
Pb	17	6	26	6	25	6	9	5	27	7
P	665	133	323	124	424	127	567	143		
Rb	68	4	80	4	68	4	16	3	17	3
Si	8.72%	0.12	10.2%	0.13	8.13%	0.12	6.89%	0.10	2.54%	0.07
Sn			32	30						
S	2.57%	0.03	6396	164	3.22%	0.19	6.10%	0.07	10.4%	0.10
Sr	289	8	266	7	240	7	699	13	482	11
Ti	2300	390	3130	420	2490	390	1650	420	650	390
W	29	24	33	23	33	24			26	26
Y	18	4	19	4	16	4				
Zn	76	11	89	12	83	12	25	9	29	10
Zr	114	6	123	6	119	6	33	6	36	6

Таблица 6. Элементный состав белой краски на фрагментах настенной живописи "alsecco" из дворцового комплекса Еркургана (% и ppm)
Table 6. Elemental composition of white paint on fragments of the "alsecco" wall paintings from the Erkurgan palace complex (% and ppm)

Хим.	3		4	
элем.	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ
Al	8305	1428	5078	1164
As			8	5
Ba	179	76	240	100
Ca	15.2%	0.13	20.5%	0.16
Cl	2930	210	5.09%	0.06
Cu	19	12	25	12
Fe	3810	140	3630	140
Mn	98	50	102	50
Ni	19	14	25	15

Хим.	3		4	
элем.	C(эл)	3σ	C(эл)	3σ
Pb	9	6	10	6
Rb	12	3	31	3
S	4.93%	0.05	6.72%	0.07
Si	3.23%	0.09	2.00%	0.05
Sr	594	12	459	10
Ti	770	400	610	390
W	37	25	26	26
Zn	24	9	28	10
Zr	33	6	63	6

Азии для изготовления красок для монументальной живописи.

Для получения красных и желтых красок могли использоваться следующие природные минералы:

Охра – $FeO(OH)$, $Fe_2O_3 \cdot H_2O$. При нагревании охры можно получить гамму оттенков от красно-бурого до жёлтого и оранжевого цветов.

Гематит Fe_2O_3 и магнетит $FeO \cdot Fe_2O_3$. Цвет варьируется от желтого до красного и коричневого оттенков.

Киноварь HgS. Применялась для красной краски еще с античных времен.

Реальгар AsS. Дает ярко-оранжевую краску.

Аурипигмент As_2S_3. Дает желтую краску.

Оксиды свинца – миниум Pb_3O_4 и литаргит PbO. Дают красную и красно-оранжевую краски.

Для получения белых и серых красок могли использоваться следующие минералы:

Кальцит – карбонат кальция $CaCO_3$ (известняк, мел). Бывает с примесями магния Mg, железа Fe, марганца Mn, цинка Zn, никеля Ni, бария Ba.

Гипс-сульфат кальция $CaSO_4$.

Гидроцеруссит $Pb_3(CO_3)_2(OH)_2$ и церуссит $PbCO_3$ (свинцовые белила). Бывают с примесями серебра Ag, кальция Ca, цинка Zn, магния Mg.

Для получения черных красок могли использоваться уголь, жженая кость, сажа, содержащие углерод.

Рассмотрим наличие в проанализированных образцах живописи химических элементов, входящих в состав перечисленных минералов. Содержание ртути Hg, мышьяка As и свинца Pb очень низкое – на уровне единиц-десятков ppm (1 ppm=0.0001%). Содержание железа Fe в красной краске и желтой краске в фреске Еркургана 1,3%–2,3%. В образцах живописи alsecco из дворцового комплекса содержание железа в красных красках 2,9%–3,3%, а в желтых красках оно заметно меньше – 0,4%–0,87%. Это позволяет говорить, что:

для изготовления красной и желтой красок для живописи Еркургана не использовались киноварь, реальгар, аурипигмент, миниум и литаргит;

для красной и желтой краски на фресках городского храма и красной краски на живописи из дворцового комплекса использовались железосодержащие минералы охра или гематит;

для желтой краски из дворцового комплекса использовалась охра.

Крайне низкое в белой краске содержание свинца Pb, входящего в состав карбонатов свинца (на уровне 13–22 ppm (0,0013%–0,0022%)), в сочетании с высоким содержанием кальция (Ca) (15–30%) указывает на то, что основой белой краски служили кальцит или гипс, а не церуссит или гидроцеруссит.

В красочных слоях исследованных образцов наблюдается присутствие алюминия Al (до 3.3%). Алюминий не входит в химическую формулу минералов, дающих красную, желтую, черную и белую краску, он может присутствовать в природных минералах в виде примеси алюмосиликата Al_2SiO_5, широко распространенного в земле, в частности, в глинистых материалах.

Существенное содержание в красках кальция Ca (4%–30%), серы S (0,2%–10%) и кремния Si (2%–10%) связано с техниками создания монументальной живописи, которая наносилась на известковую, ганчевую, лессовую основы, состоящие преимущественно из карбоната и сульфата кальция, песка (кварца SiO_2) и глинистых материалов.

Сравним содержание основных химических элементов в красках живописи, выполненной в техниках affresco и alsecco (рис. 2; 3; 4). Сразу же обращает на себя внимание содержание кальция Ca и серы S в красках на фрагментах фрески (affresco) и живописи на сухой штукатурке (alsecco). Видно, что содержание кальция на поверхности красочного слоя фрески существенно больше содержания кальция на поверхности живописи, нанесенной на сухую штукатурку.

Напомним, что фрески выполняются водными растворами пигментов, наносимыми на свежую песчано-известковую штукатурку. После нанесения краски на такую штукатурку слой краски пропитывается известковым раствором, который выходит на поверхность этого слоя.

При высыхании этого раствора известь вступает в реакцию с углекислым газом воздуха и превращается в кальцит $CaCO_3$, образующий на поверхности красочного слоя кальцитовую пленку. Это приводит к высокому содержанию кальция на поверхности фрески, подтверждая, что фрагменты № 1 –№ 4, найденные в раскопе городского храма, действительно фрагменты фрески, выполненные по технике affresco.

Содержание серы в живописи на сухой штукатурке заметно выше, чем во фреске. Можно полагать, что это сера, входящая в состав гипсовой и ганчевой штукатурки ($CaSO_4$) для живописи alsecco.

Обращает на себя внимание образец "глина", находящийся на тыльной стороне фрагментов фрески. Он представляет из себя остатки выравнивающей первичной штукатурки, на которую наносилась песчано-известковая штукатурка, являющаяся грунтовкой для краски. В составе этого образца виден

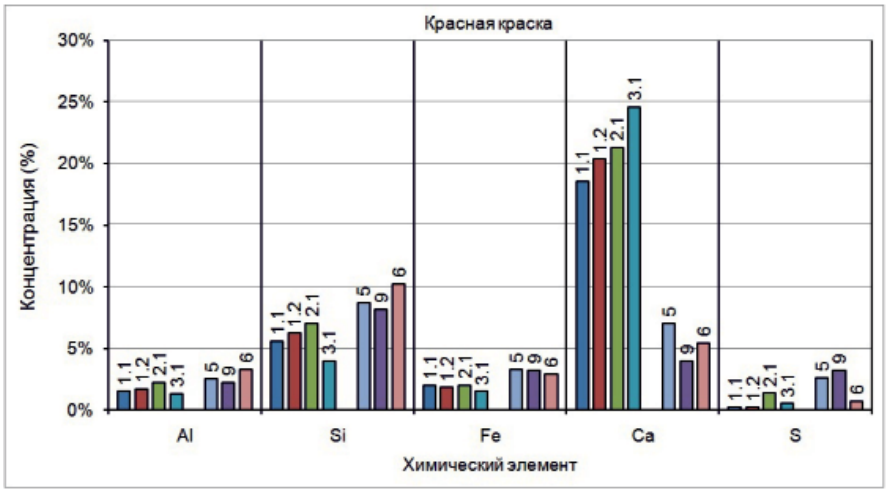
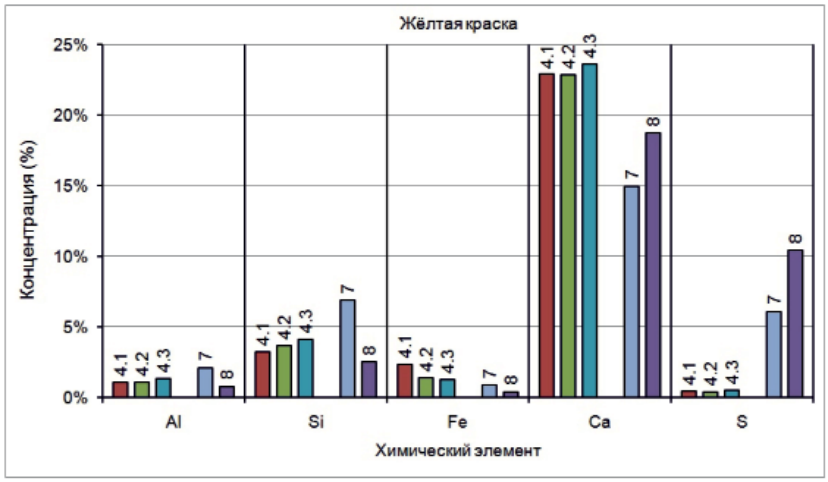


Рис. 2. Сравнение содержания основных химических элементов в красной краске на фрагментах живописи из Еркургана (1.1, 1.2, 2.1, 3.1 – affresco; 5, 6, 9 – al-secco)

Fig. 2. Comparison of the content of the main chemical elements in red paint on fragments of paintings from Erkurgan (1.1, 1.2, 2.1, 3.1 – affresco; 5, 6, 9 – alsecco)

Рис. 3. Сравнение содержания основных химических элементов в желтой краске на фрагментах живописи из Еркургана (4.1, 4.2, 4.3 – affresco; 7, 8 – alsecco)

Fig. 3. Comparison of the content of the main chemical elements in yellow paint on fragments of paintings from Erkurgan (4.1, 4.2, 4.3 – affresco; 7, 8 – alsecco)



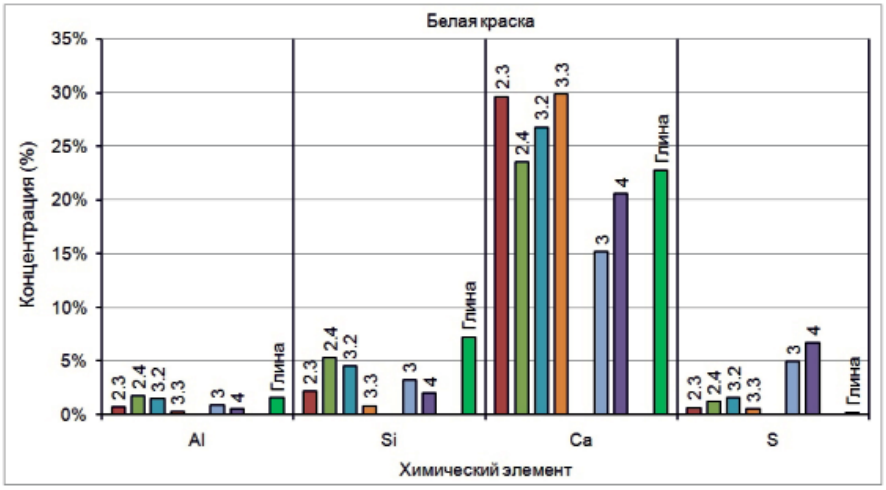


Рис. 4. Сравнение содержания основных химических элементов в белой краске на фрагментах живописи и в её глиняной грунтовке из Еркургана (2.3, 2.4, 3.2, 3.3 – affresco; 3, 4 – alsecco, глина – штукатурка)

Fig. 4. Comparison of the content of the main chemical elements in white paint on fragments of paintings and in their clay priming from Erkurgan (2.3, 2.4, 3.2, 3.3 – affresco; 3, 4 – alsecco, clay – plaster)

алюминий (1,5%), высокое содержание кальция (22,8%), кремния (7,2%) и малое содержание серы (0,18%). Такое содержание серы говорит о том, что в состав первичной штукатурки практически не входил гипс $CaSO_4$ и она выполнена на основе лёсса, который является песчано-глинистой сильно известковой породой (Al_2SiO_5, SiO_2, $CaCO_3$).

Заключение

Подведём итоги исследований. Методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа с помощью портативного спектрометра Vanta Element-S получены экспериментальные данные по элементному составу красок монументальной живописи, фрагменты которой были найдены на древнем горо-

дище Еркурган в Кашкадарьинской области Узбекистана. Часть фрагментов, найденная рядом с городским храмом, по результатам осмотра имела признаки, присущие не типичным для древнего Согда фрескам. Результаты анализа этих фрагментов показали, что их красочная поверхность покрыта кальцитной пленкой. Кальцитная пленка отсутствовала на фрагментах, найденных в дворцовом комплексе и по внешним признакам идентифицированных археологами как фрагменты живописи, выполненные в технике alsecco – росписи по сухой штукатурке. Это позволило подтвердить мнение археологов, что фрагменты храмовой росписи были фрагментами фрески – живописи, выполненной по свежей известковой штукатурке в технике affresco, buon fresco.

Результаты элементного анализа позволили определить круг минеральных пигментов, из которых были сделаны краски красного, желтого, белого цвета, использованные древними мастерами для монументальной живописи Еркургана.

Отсутствие ртути, мышьяка и свинца в красках красного и желтого цвета позволило сказать, что для изготовления красной и желтой красок для живописи Еркургана не использовались киноварь, реальгар, аурипигмент, миниум и литаргит.

Для красной и желтой красок на фресках городского храма и красной краски на живописи из дворцового комплекса использовались или охра, или гематит.

Для желтой краски на живописи дворцового комплекса использовалась охра.

Крайне низкое в белой краске содержание свинца (~0,001%–~0,002%) и высокое содержание кальция (15%–30%) позволяет говорить, что белая краска была сделана на основе кальцита или гипса, а не карбонатов свинца.

ЛИТЕРАТУРА

Алексеев-Алюрви Ю.В. Краски старых мастеров от античности до конца XIX века. М.: Центр информационных технологий, информатики и информации, 2004. 160 с.

Виннер А. Фресковая и темперная живопись. Вып. I. Материалы и техника стенописей античных мастеров на юге СССР. М.; Л.: Искусство, 1948. 67 с.

Исамиддинов М.Х., Сулейманов Р.Х. Еркурган (стратиграфия и периодизация). Ташкент: Фан, 1984. 161 с.

Кабанов С.К. Нахшеб на рубеже древности и средневековья (III-VII вв.). Ташкент: Фан, 1977. 174 с.

Киплик Д.И. Техника живописи. М.: ЗАО "Сварог и К", 2002. 357 с.

Косолапов А.И., Маршак Б.И. Стенная живопись Средней и Центральной Азии (историко-художественное и лабораторное исследование). СПб.: Формика, 1999. 79 с.

Крестов М.А., Пшеницин П.Л., Толстихина К.И. Техника фрески. Материалы по технической подготовке стенной росписи фреской. Штукатурка и краски. М.: Государственное архитектурное издательство Академии архитектуры СССР, 1941. 127 с.

Лобода А.Ю., Трунькин И.Н., Светогоров Р.Д., Пожидаев В.М., Камаев А.В., Малахов С.Н., Пельве К.Ю., Терещенко Е.Ю., Хайрединова Э.А., Айбабин А.И., Яцишина Е.Б. Исследование пигментов и связующих красочных слоев росписей храма X–XIII вв. на плато Эски-Кермен // Материалы по археологии, истории и этнографии Таврии. 2021. Вып. XXVI. С. 156-174.

Лукьянова Т.А. Технологические особенности древнерусских фресок // Ярославский педагогический вестник. № 3. Т. I (гуманитарные науки). 2012. С. 214–218.

Никитин А.М. Художественные краски и материалы: справочник. М.; Вологда: Инфра-инженерия, 2021. 412 с.

Реутова М., Джеральдин Фрай. Минеральные краски в древней живописи Афрасиаба // История и археология Турана. Вып. 4 / отв. ред. А.Э. Бердимурадов. Самарканд: Институт археологии АН РУз, 2019. С. 286–295.

Сулейманов Р.Х. Древний Нахшаб*:* проблемы цивилизации Узбекистана VII в. до н. э. – VII в. н. э. Самарканд; Ташкент: Фан, 2000. 343 с., 87 л. ил.

Сулейманов Р. Нахшаб – тайны забытой цивилизации. Ташкент: Маънавият, 2004. 40 с.

Храмченкова Р.Х., Каплан П.Ю., Ситдиков А.Г., Гареев Б.И., Баталин Г.А. Неразрушающий рентгенофлуоресцентный метод исследования фресковой росписи как инструмент мониторинга процессов деградации левкаса // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник Россий-

ского государственного художественно-промышленного университета им. С.Г. Строганова. 2019. № 3-1. С. 79-88.

Шаронов И.А., Алибеков А.С., Джумабоев А., Иванов А.К., Реутова М.А., Холикулов У.А. Рамановская спектрометрия и рентгенофлуоресцентный анализ в исследованиях древней настенной живописи Центральной Азии // Научный вестник Самаркандского государственного университета. 2024. № 1/1(143). С. 68–75.

Bayerova T. Insights into the painting materials and techniques of the original interior decoration // Nako. Research and conservation in the Western Himalayas / ed. Martina Haselberger. Wien, Köln, Weimar: Böhlau Verlag GMBH&Co, 2016. P. 235–273.

Cechák T., Trojek T., Ružek V., Šefcu R., Prušová H. X-ray fluorescence analysis of pigments in gothic frescoes, coats of arms, and polychromy on sculptures on the triforium in St. Vitus Cathedral on the territory of the Czech Kingdom in the 14th century // Materials. 2022. Vol. 15. 5033. doi.org/10.3390/ma15145033.

Cortea Ioana Maria, Luminita Hervase, Lucian Ratoiu, Ovidiu Tentea and Monica Dinu. New insights into the materials and painting techniques of ancient wall paintings from the Roman province of Dacia: a minimally invasive multi-method approach // H*eritage.* Vol. *7*(9). 2024. P. 5268–5294.

Giuseppe E. de Benedetto, Daniela Fico, Eleonora Margapoti, Antonio Pennetta, Antonio Cassiano and Brizia Minerva. The study of the mural painting in the 12th century monastery of Santa Maria delle Cerrate (Puglia-Italy): characterization of materials and techniques used // Journal of raman spectroscopy. Vol. 44. 2013. P. 899–904.

Handbook of practical X-ray fluorescence analysis / eds. B. Beckhoff, B. Kanngiesser, N. Langhoff, R. Wedell, H. Wolff. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 2006. 898 p.

Historical painting techniques, materials and studio practice / eds. Arie Wallert, Erma Hermens and Marja Peek. Preprints of a symposium [held at] University of Leiden, the Netherlands, 26-29 june 1995. 236 p.

Holclajtner-Antunović I., Stojanović-Marić M., Bajuk-Bogdanović D., Žikić R., Uskoković-Marković S. Multi-analytical study of techniques and palettes of wall paintings of the monastery of Žiča, Serbia // Spectrochimica Acta. Part a: molecular and biomolecular spectroscopy. Vol. 156. 2016. P. 78–88.

Janssens Koen, Geert van der Snickt, Frederik Vanmeert, Stijn Legrand, Gert Nuyts, Matthias Alfeld, Letizia Monico, Willemien Anaf, Wout de Nolf, Marc Vermeulen, Jo Verbeeck, Karolien de Wael. Non-invasive and non-destructive examination of artistic pigments, paints, and paintings by means of X-ray methods // Topics in current chemistry. Vol. 374(6):81. 2016. doi:10.1007/s41061-016-0079-2

Khramchenkova R., C. Ionescu, A. Sitdikov, P. Kaplan, Á. Gál, B. Gareev. A PXRF in situ study of 16th–17th century fresco paints from Sviyazhsk (Tatarstan Republic, Russian Federation) // Minerals. Vol. 9, issue 114. 2019. doi:10.3390/min9020114.

Mantler M., Schreiner M. X-ray fluorescence spectrometry in art and archaeology // X-ray spectrometry. Vol. 29. 2000. P. 3–17.

Tomomi Tamura, Sungwook Ryu, Marina A. Reutova. Scientific investigation of wall paintings from the Fayaztepa site // Conservation and researth of early buddhist wall paitings from the Fayaztepa site, Southern Uzbekistan. Japan, Nagoya. 2021. P. 43-102.

Zuleika Murat. Wall paintings through the ages: the Medieval period (Italy, twelfth to fifteenth century) // Archaeological and anthropological sciences No. 13. 2021. P. 191. doi.org/10.1007/s12520-021-01410-4.

Информация об авторах:

Реутова Марина Аркадьевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией, Самаркандский институт археологии (г. Самарканд, Узбекистан); mreutova@gmail.com

Шаронов Иосиф Алексеевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт ядерных технологий, Самаркандский Государственный Университет (г. Самарканд, Узбекистан); jsharonov@gmail.com

Иванов Анатолий Константинович, базовый докторант, Институт ядерных технологий, Самаркандский Государственный Университет (г. Самарканд, Узбекистан);; dvader425@gmail.com

Алибеков Акбар Сувонович, старший научный сотрудник, Институт ядерных технологий, Самаркандский Государственный Университет (г. Самарканд, Узбекистан); akbaralibekov@gmail.com

REFERENCES

Alekseev-Alyurvi, Yu. 2004. *Kraski starykh masterov ot antichnosti do kontsa xix veka (The paints of old masters from antiquity to the end of the 19th century).* Moscow: “Tsentr informatsionnykh tekhnologii, informatiki i informatsii” publ. (in Russian).

Vinner, A. 1948. *Freskovaya i tempernaya zhivopis'. Vypusk I. Materialy i tekhnika stenopisei antichnykh masterov na yuge SSSR. (Fresco and tempera painting. Issue I. Materials and technique of wall paintings by classical masters in the south of the USSR).* Moscow; Leningrad: “Iskusstvo” publ. (in Russian).

Isamiddinov, M. Kh., Suleimanov, R. Kh. 1984. *Erkurgan (stratigrafiya i periodizatsiya) (Erkurgan (stratigraphy and periodization)).* Tashkent: “Fan” publ. (in Russian).

Kabanov, S. K. 1977. *Nakhsheb na rubezhe drevnosti i srednevekov'ya (III-VII vv.) (Nakhshab at the turn of Antiquity and the Middle Ages (3rd–7th centuries)*). *Tashkent: “Fan” publ.* (in Russian).

Kiplik, D. I. 2002. *Tekhnika zhivopisi (Painting technique).* Moscow: ZAO "Svarog i K" publ. (in Russian).

Kossolapov, A. I., Marshak, B. I. 1999. *Stennaya zhivopis' Sredney i Tsentral'noy Azii (istoriko-khudozhestvennoe i laboratornoe issledovanie) (Murals along the silk road (combined art historical and laboratory study)). Saint-Petersburg: “Formica” publ.* (in Russian, English).

Krestov, M. A., Pshenitsin, P. L., Tolstikhina, K. I. 1941. *Materialy po tekhnicheskoy podgotovke stennoy rospisi freskoy. Shtukaturka i kraski (Materials on the technical preparation of wall paintings executed in fresco: Plaster and paints).* Moscow: the State architectural publishing house of the Academy of architecture of the USSR (in Russian).

Loboda A. Yu., Trunkin, I. N., Svetogorov, R. D., Pojidaev, V. M., Kamaev, A. V., Malakhov, S. N., Pelve, K. Yu., Tereschenko, E. Yu., Khairedinova, E. A. Aibabin, A. I., Yatsishina, E. B. 2021. In *Materialy po arkheologii, istorii i etnografii Tavrii (Materials in the archaeology, history and ethnography of Tauria*) XXVI, 156–174 (in Russian).

Lukianova, T. A. 2012. In *Yaroslavskii pedagogicheskii vestnik (gumanitarnye nauki) (Yaroslavl pedagogical bulletin (humanities))* (3), vol. I, 214–218 (in Russian).

Nikitin, A. M. 2021. *Khudozhestvennye kraski i materialy (Artistic paints and materials).* Moscow; Vologda: “Infra-inzheneriya” Publ. (in Russian).

Reutova, M., Fray, G. 2019. In Berdimuradov, A. E. (ed.). *Istoriya i arkheologiya Turana (History and archaeology of Turan)* 4. Samarkand, 286–295 (in Russian).

Suleimanov, R. Kh. 2000. *Drevnii Nakhshab: problemy tsivilizatsii Uzbekistana VII v. do n.e.– VII v. n.e. (Ancient Nakhshab: issues of Uzbekistan civilization in the 7th century bc – 7th century ad).* Samarkand; Tashkent : “Fan” publ. (in Russian).

Suleimanov, R. Kh. 2004. *Nakhshab – tainy zabytoi tsivilizatsii (Nakhshab: secrets of a forgotten civilization).* Tashkent: "Ma’naviyat" publ. (in Russian).

Khramchenkova, R. Kh., Kaplan, P. Yu., Sitdikov, A. G., Gareev, B. I., Batalin, G. A. 2019. In *Dekorativnoe iskusstvo i predmetno-prostranstvennaya sreda. Vestnik Rossiyskogo gosudarstvennogo khudozhestvenno-promyshlennogo universiteta im. S.G.Stroganova (decorative art and environment. Gerald of the RGHPU)* (3–1), 79–88 (in Russian).

Sharonov, I. A., Alibekov, A. S., Dzhumaboev, A., Ivanov, A. K., Reutova, M. A., Kholikulov, U. A. 2024. In *Nauchnyy vestnik Samarkandskogo gosudarstvennogo universiteta (Scientific bulletin of SamSU)* 1/1(143), 68–75 (in Russian).

Bayerova, T. 2016. In Martina Haselberger (ed.). *Nako. Research and conservation in the Western Himalayas*. Wien; Köln; Weimar: Böhlau Verlag GMBH&Co, 235–273.

Cechák, T., Trojek, T., Ružek, V., Šefcu, R., Prušová, H. 2022. In *Materials* 15, 5033. doi.org/10.3390/ma15145033.

Cortea Ioana Maria, Luminita Ghervase, Lucian Ratoiu, Ovidiu Tentea and Monica Dinu. 2024. In *Heritage* 7 (9), 5268–5294.

Giuseppe E. de Benedetto, Daniela Fico, Margapoti, Eleonora, Pennetta, Antonio, Cassiano, Antonio, Minerva, Brizia. 2013. In *Journal of raman spectroscopy* vol. 44, 899–904.

Beckhoff, B., Kanngiesser, B., Langhoff, N., Wedell, R., Wolff, H. (eds). 2006. *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Berlin, Heidelberg: Springer-verlag.

Arie Wallert, Erma Hermens, and Marja Peek (eds.). 1995. *Historical painting techniques, materials and studio practice.* Preprints of a symposium [held at] University of Leiden, the Netherlands, 26-29 june 1995.

Holclajtner-Antunović, I., Stojanović-Marić, M., Bajuk-Bogdanović, D., Žikić, R., Uskoković-Marković, S. 2016. In *Spectrochimica acta. Part a: molecular and biomolecular spectroscopy* (156), 78–88.

Janssens Koen, Geert van der Snickt, Frederik Vanmeert, Stijn Legrand, Gert Nuyts, Matthias Alfeld, Letizia Monico, Willemien Anaf, Wout de Nolf, Marc Vermeulen, Jo Verbeeck, Karolien de Wael. 2016. In *Topics in current chemistry*, 374(6):81. doi:10.1007/s41061-016-0079-2

Khramchenkova, R., Ionescu, C., Sitdikov, A., Kaplan, P., Gál, *Á*, Gareev, B. 2019. In *Minerals* vol. 9, issue 114. doi:10.3390/min9020114.

Mantler, M., Schreiner, M. 2000. In *X-ray spectrometry* (29), 3–17.

Tomomi Tamura, Sungwook Ryu, Marina A. Reutova. 2021. In *Conservation and researth of early buddhist wall paitings from the Fayaztepa site, Southern Uzbekistan. Japan, Nagoya,* 43–102.

Zuleika Murat. 2021. In *Archaeological and anthropological sciences* (13), 191. doi.org/10.1007/s12520-021-01410-4.

About the Authors:

Reutova Marina A. Candidate of Chemical Sciences, Senior Research Fellow, Head of the Laboratory, Samarkand Institute of Archaeology. Abdullayeva St., 3., Samarkand 140305, Uzbekistan; mreutova@gmail.com

Sharonov Ioseph A. Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher Fellow, Institute of Nuclear Technologies, Samarkand State University. 15 University Boulevard, Samarkand, 140104, Uzbekistan; jsharonov@gmail.com

Ivanov Anatoly K. Doctoral Student, Institute of Nuclear Technologies, Samarkand State University. 15 University Boulevard, Samarkand, 140104, Uzbekistan; dvader425@gmail.com

Alibekov Akbar S. PhD, Senior staff scientist, Samarkand State University. 15 University Boulevard, Samarkand, 140104, Uzbekistan; akbaralibekov@gmail.com

Статья поступила в журнал 25.02.2026 г.
Статья принята к публикации 09.07.2026 г.
Авторы внесли равноценный вклад в работу