РОССИЙСКАЯ АРХЕОЛОГИЯ, 2022, № 3, с. 107–121

ЭМАЛЕВЫЙ МЕДАЛЬОН ЗОЛОТОЙ ПОДВЕСКИ ИЗ ВЕЛИКОГО НОВГОРОДА

© 2022 г. С. И. Валиулина[1, *], О. С. Румянцева[2, **], Е. С. Ващенкова[3, *], П. А. Волков[3, ****], А. М. Исмагулов[3, *****], А. Н. Мандрыкина[3, ******], В. М. Ретивов[3, *******], А. Г. Куликов[4, ********], Е. Ю. Терещенко[5, *********], Е. Б. Яцишина[3, **********]**

[1] Казанский федеральный университет, Казань, Россия

[2] Институт археологии Российской академии наук, Москва, Россия

[3] НИЦ "Курчатовский институт" и НИЦ "Курчатовский институт"–ИРЕА Москва, Россия

[4] Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, Москва, Россия

[5] ФНИЦ "Кристаллография и фотоника" РАН, НИЦ "Курчатовский институт", НИЦ "Курчатовский институт"–ИРЕА, Москва, Россия

**E-mail: svaliulina@inbox.ru*

***E-mail: o.roumiantseva@mail.ru*

****E-mail: e katerina2708@mail.ru*

*****E-mail: volkov.pavel.msu@yandex.ru*

******E-mail: ismagulov.art@mail.ru*

*******E-mail: mandrykina_av@mail.ru*

********E-mail: vasilii_retivov@mail.ru*

*********E-mail: ontonic@gmail.com*

**********E-mail: elenatereschenko@yandex.ru*

***********E-mail: yacekaterina@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.02.2022 г.
После доработки 25.02.2022 г.
Принята к публикации 22.03.2022 г.

Статья посвящена анализу вставки, выполненной в технике перегородчатой эмали на золотой подвеске начала XIII в. из Великого Новгорода. Состав эмалей анализировался методами растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом и атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с пробоотбором лазерной абляцией. Технология и состав красной эмали соответствуют византийской ремесленной традиции. Эмали белого, синего и бирюзового цветов имеют состав, типичный для римского содового стекла и содержат сурьму, использование которой в стеклоделии завершилось в IV в. Это позволяет заключить, что в качестве сырья для них вторично использована римская смальта – практика, применявшаяся в европейском эмальерном производстве до конца XII – начала XIII в. Можно предположить три варианта происхождения украшения. Первый – подвеска с эмалевой вставкой является византийским импортом. Второй – эмалевая вставка могла быть выполнена в одной из мастерских Византии и привезена на Русь, где украсила золотой квадрифолий местной работы. Третий – вставка, как и все изделие, произведена греческими мастерами в одном из русских городов. В любом случае при ее изготовлении использована импортная (вероятно, византийская) эмаль.

Ключевые слова: Великий Новгород, XIII в., перегородчатая эмаль, электронная микроскопия, рентгенофлуоресценое картирование, атомно-эмиссионная спектроскопия, химический состав, технология, Византия.

DOI: 10.31857/S0869606322030175

Главным украшением золотой подвески из слоя начала XIII в. Великого Новгорода (Гайдуков и др., 2022) является медальон, выполненный в технике перегородчатой эмали. Круглая цилиндрическая вставка диаметром 7 мм помещена в центре лицевой стороны квадрифолия, укреплена на золотой основе с некоторым отклонением от вертикальной оси (рис. 1, 2). Археологическое стекло и эмали при исследовании на междисциплинарной основе обладают особенно информа-

Рис. 1. Фото золотой подвески-реликвария.
Fig. 1. Photo of a golden reliquary cross-pendant

тивными возможностями. Цель работы – представить технологическую характеристику эмали золотой подвески и определить ее происхождение.

Эмалевая вставка имеет хорошую сохранность, чистую без пороков и патины поверхность (рис. 2). Композиция выполнена из непрозрачного стекла четырех цветов: в центре расположено изображение трилистника – крина, заполненное красной эмалью. Вокруг белая эмаль создает фон, выделяя контрастом центральную фигуру. Крин вместе с фоном охватывает кольцо синей эмали, символизируя проросший стебель. Под трилистником расположен треугольник бирюзовой эмали. Все изображение обрамляет внешнее кольцо красной эмали. Очевидно, красная непрозрачная эмаль обладает особым статусом во всей композиции, и это не является особенностью новгородской находки. Красный контур чаще всего окружает эмалевые медальоны в средневековых произведениях. Так, аналогичные нашему изображению рисунки крина с треугольником внизу в окружении белого, синего и красного полей помещены в центр золотых колтов из клада 1887 г. в Киеве (Новаковская-Бухман, 2015. С. 30) и клада 1900 г. из Сахновки (Макарова, 1975. С. 25).

Палитру ранних эмалей составляют четыре цвета: красный, белый, синий и зеленый. С середины XII в. колористический перечень расширяется, в том числе появляется бирюзовый цвет (Макарова, 1996. С. 58). В эмали квадрифолия классика четырех цветов сохраняется, только зеленый цвет заменяется бирюзовым. В искусстве перегородчатой эмали подобная схема изображения крина входит в число основных элементов орнаментации, представляя исходную форму (Макарова, 1975. Рис. 4, I.1), а значит, обладает широким представительством.

Повторяющиеся изображения крина в округлом или сердцевидном обрамлении могли составлять бордюр эмалевой композиции (Byzantium..., 2008. P. 320, ill. 271,1), элемент крин в круге являлся украшением одежд святых, нимбов и корон, крыльев птиц и сиринов на золотых колтах (Кондаков, 1896. С. 203, рис. 120; Табл. II, 9; Табл. III, 2, 3; Табл. VI, 1, 2; Табл. X, 4; Amiranaschwili, 1971. S. 62, ill. 37, 38; Смирнова, Доманский, 1974. С. 35, рис. 99, 100; Макарова, 1975. С. 34, 35, табл. 4, 1–2, 10, 11, № 33–36). Отдельные эмалевые вставки, наряду с драгоценными камнями, расцвечивали церемониальные кресты, реликварии (Byzantium..., 2008. P. 221, ill. 188; P. 284, ill. 245) и золотые панели окладов икон (Amiranaschwili, 1971. S. 106, ill. 67, 68). Этот перечень произведений перегородчатой эмали, датирующихся, в основном, XI–XIII вв., может быть значительно расширен. В поиске аналогий особого внимания заслуживает золотая пластина с мелким и четким ковровым декором перегородчатой эмали, в котором трилистник-крин выступает ведущим элементом. Произведение константинопольской работы датируется второй половиной XI в., происходит из Хиландарского монастыря Сретенья Богородицы, в настоящее время хранится в собрании Национального музея Сербии в Белграде.

Выемчатые и перегородчатые эмали не единственная и не первая техника, в декоративной системе которой утвердилось изображение крина. Гораздо раньше этот, изначально восточный мотив, в разных сочетаниях проявил себя в византийских художественных произведениях из металла и камня (Даркевич, 1975. С. 20, 137, 159, илл. 7, 200а, 233), в резьбе по кости (Райс, 2002. С. 71, илл. 64), на пергаменте (Byzantium..., 2008. P. 237, № 211) и тканях (Райс, 2002. С. 28, 65, илл. 22, 58). Д.Т. Райс обращает внимание на то, что “ткани, сотканные в мастерских Константинополя, во многом обязаны Востоку” и технологией, и декоративным оформлением. Текстиль был одним из сильных проводников восточной декоративной традиции в византийскую культуру (Райс, 2002. С. 64).

Визуально – инструментальный анализ морфологии и технологии эмалевой вставки проведен методом оптической микроскопии на стереомикро-

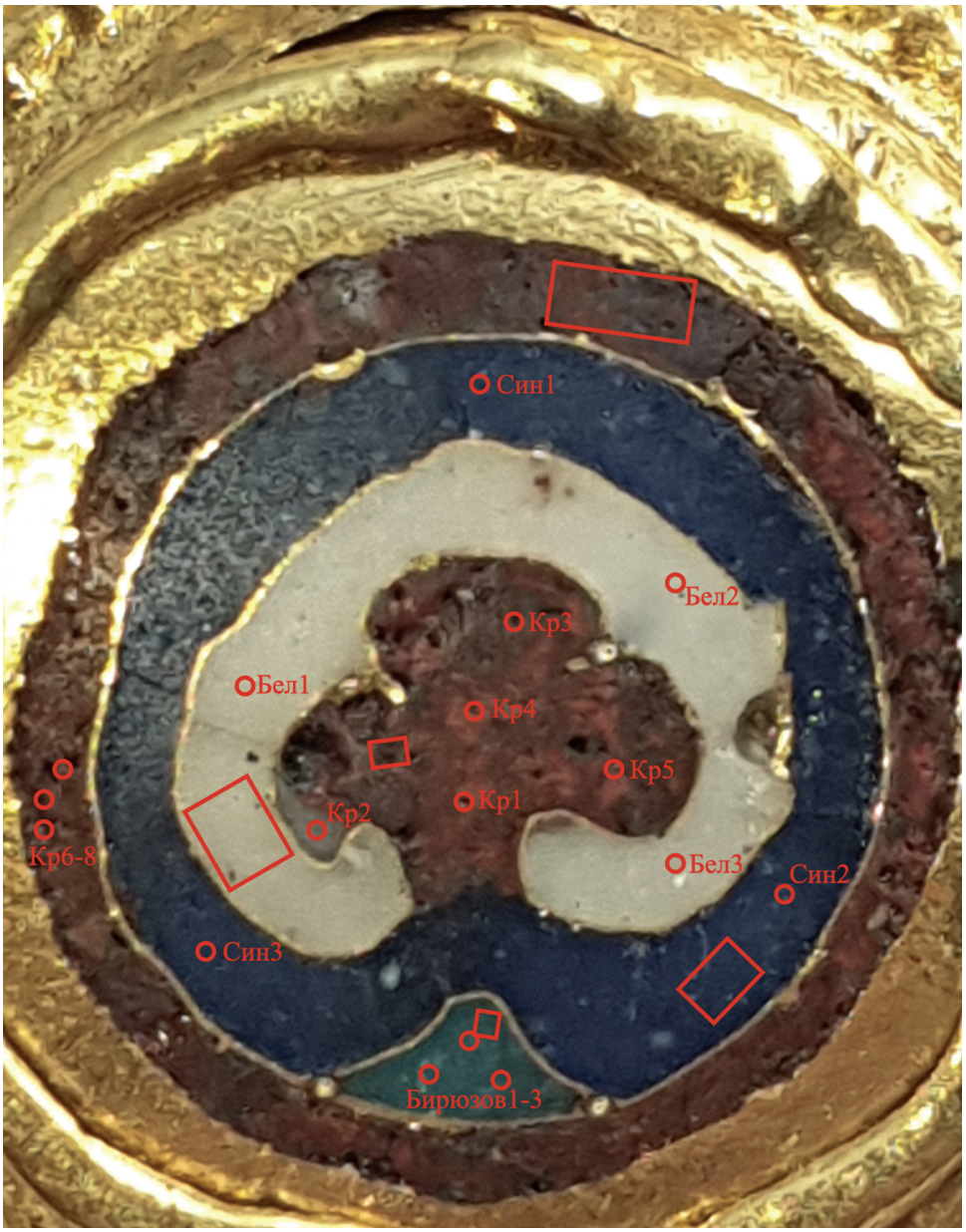

Рис. 2. Фото эмалевой вставки с обозначением областей спектров. Области исследования состава эмалей методами РЭМ/ЭРМ (квадраты) и АЭС-ИСП-ЛА (круги).

Fig. 2. Photo of an enamel inset with the designation of spectral areas. Areas of studying the composition of enamels by SEM (squares) and LA-ICP-AES (circles)

скопе STEMI-2000 (Zeiss) в Центре коллективного пользования (ЦКП) Института археологии РАН. При значительном увеличении фиксируются мелкие сколы, пузырьки, негомогенная структура эмали и неоднородный цвет.

Анализ состава эмалей выполнен в ЦКП НИЦ "Курчатовский институт" – ИРЕА методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой с пробоотбором методом лазерной абляции (АЭС-ИСП-ЛА). Для всех измерений выполнена предварительная очистка поверхности путем "преабляции".

Анализ особенностей микроструктуры цветных эмалей и их взаимосвязи с распределением элементов был выполнен методом растровой электронной микроскопии с энергодисперсионным рентгеновским микроанализом (РЭМ/ЭРМ) в НИЦ "Курчатовский институт".

РЭМ/ЭРМ-исследования выполнялись с помощью растрового двухлучевого электронно-ионного микроскопа Versa 3D (Thermo Fisher Sci-

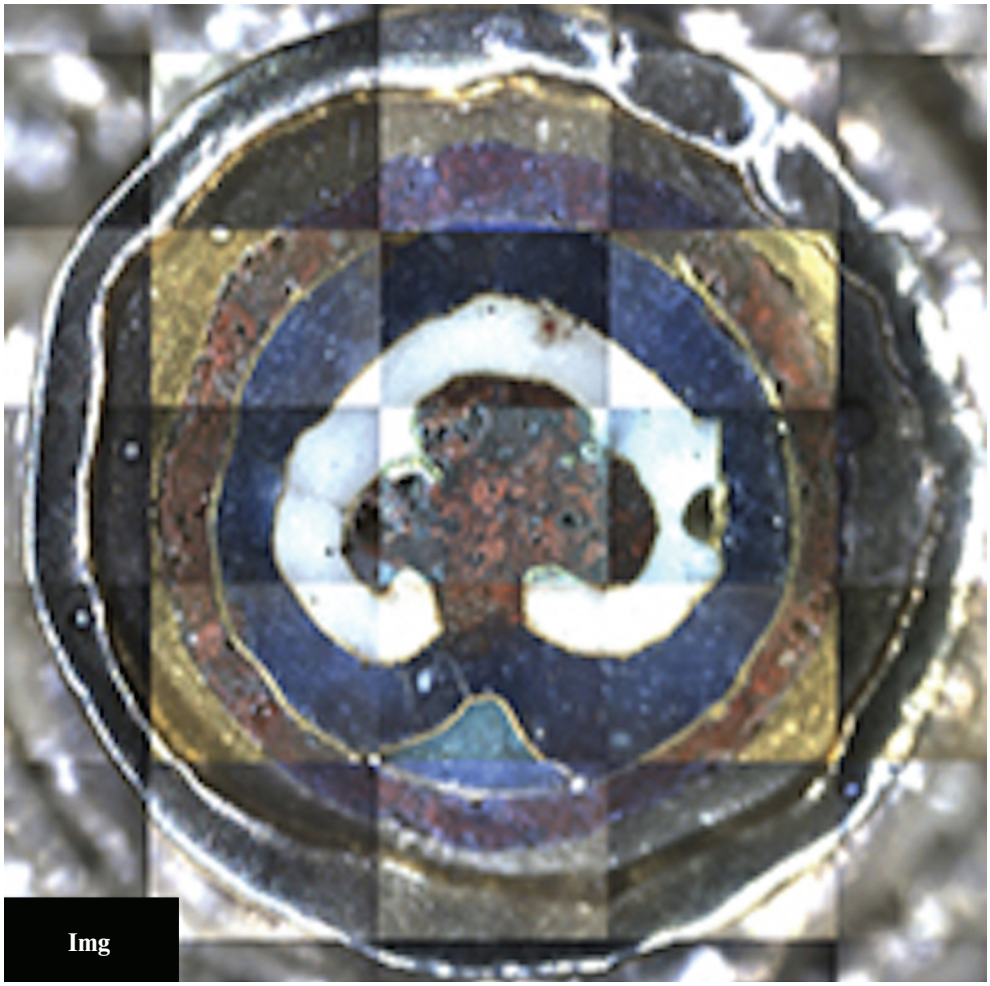

Рис. 3. Оптическая фотография области РФлА-картирования.
Fig. 3. Optical photograph of the XRF mapping area

entific) с системой ЭРМ (EDAX) при ускоряющем напряжении 30 кВ в режиме низкого вакуума (70 Па). Обработка спектров ЭРМ осуществлялась ПО TEAM (EDAX). Суммарное содержание обнаруженных элементов в оксидах приведено к 100%. Чувствительность метода составляет 0.1–0.5 мас. %. Данные РЭМ/ЭРМ о составе эмалей были суммированы по площади около 0.2 × 0.2 мм^2 (мас. %).

Исследования эмалей методом АЭС-ИСП-ЛА выполнены на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP6300 Duo (Thermo Fisher Scientific) с приставкой лазерного пробоотбора NWR 213 (New Wave Research). Полученные результаты характеризуют соотношение элементов в составе материала после нормирования суммы оксидов элементов на 100%. Для наилучшего усреднения данных о составе материала использована максимальная апертура лазера (110 мкм), участок сканирования составлял около 330 × 800 мкм. Измерения состава эмали каждого цвета проводились в двух – восьми (при неоднородности цвета) образцах, за результат принято среднее значение (таблица).

Особенности распределения элементов в эмалях демонстрируют полноразмерные карты (рис. 3, 4). Рентгенофлуоресцентное (РФлА) картирование проводилось на установке ORBIS micro-XRF в ЦКП “Структурная диагностика материалов” ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН. Анализ осуществлен на пучках диаметром 2, 1 мм или 30 мкм на воздухе и в вакууме с максимальным ускоряющим напряжением 40 кВ (рентгеновская трубка с родиевым анодом).

Красная эмаль (таблица, *1*) представляет собой золистое стекло типа $Na_2O(K_2O)$–CaO–PbO–SiO_2, сформировавшегося за счет технологических добавок, введенных для получения красного глухого стекла.

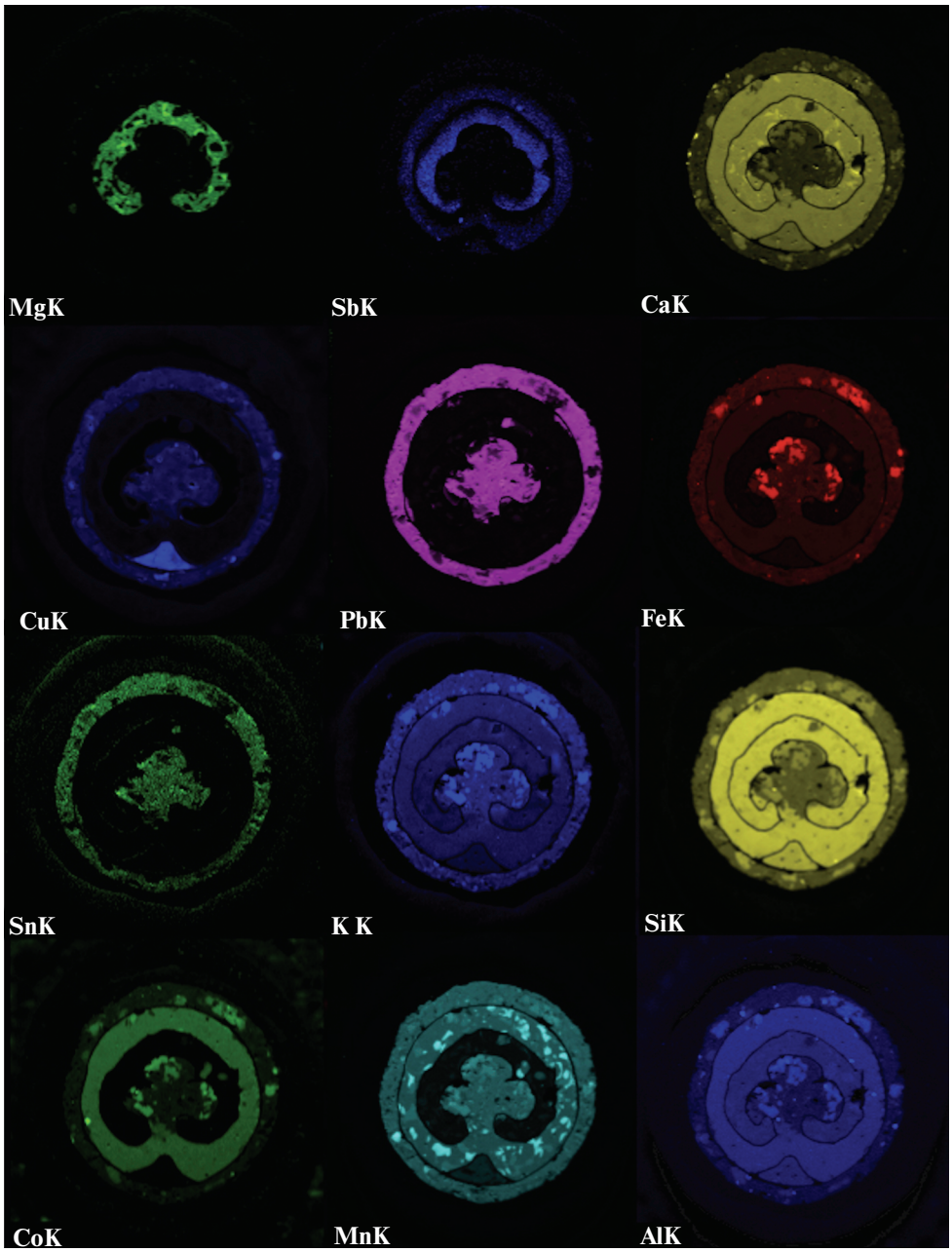

Рис. 4. Карты распределения элементов, полученные РФлА-картированием 30-микронным пучком по поверхности эмалевого медальона.

Fig. 4. Maps of element distributions obtained by XRF mapping with a 30-micron beam over the surface of the enameled medallion

Глухое стекло насыщенного красного цвета окрашено купритом – соединением одновалентной меди (Cu_2O, в среднем 2.09%), характерная дендритная кристаллизация расплава зафиксирована на РЭМ-изображениях (рис. 5). “Сильно восстановительная” атмосфера способствует образованию элементарных кристаллов меди (Freestone, 1987). Куприт, сообщающий стеклу красный цвет и непрозрачность, формируется в восстановительной атмосфере (Gedzevičiūtė et al., 2009. P. 22).

Нужная для формирования кристаллов куприта атмосфера обеспечивалась добавкой свинца, древесного угля/золы и оксида железа (Freestone, 1987. P. 183; Freestone et al., 2003). Работа с таким стеклом при доступе кислорода с сохранением заданных качеств являлась сложной операцией из-за тенденции куприта к окислению и раство-

Состав цветных эмалей по данным АЭС-ИСП-ЛА (средние значения в мас. % оксидов).
Composition of coloured enamels according to AES-ICP-LA data (average values in wt % of oxides)

№ п/п	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
Цвет эмали	Красная	Белая/красная	Белая	Синяя	Бирюзовая
Количество измерений	7	1	3	3	2
SiO_2	51.4	67.3	68.3	69.2	69.3
Al_2O_3	1.79	1.81	1.97	2.39	2.38
B_2O_3	0.02	0.069	0.07	0.06	0.077
BaO	0.02	0.015	0.02	0.02	0.02
CaO	5.35	6.15	6.23	6.41	5.48
CoO	<0.01	0.002	<0.01	0.13	<0.01
Cr_2O_3	0.001	0.002	0.002	0.001	0.003
Cu_2O	2.09	0.050	–	–	–
CuO	2.33	0.055	0.04	0.30	3.15
Fe_2O_3	2.52	0.45	0.41	1.03	0.62
K_2O	1.95	0.65	0.65	0.67	0.62
MgO	1.61	2.83	2.21	0.58	0.64
MnO	0.81	0.030	0.05	0.37	0.14
Na_2O	6.44	17.4	16.1	16.7	16.0
NiO	0.006	0.004	0.002	0.005	0.002
PbO	25.4	0.25	0.45	0.15	0.14
Sb_2O_3	0.03	2.82	3.30	1.74	1.25
SnO	0.22	<0.01	0.01	0.03	0.06
SrO	0.03	0.053	0.05	0.05	0.05
TiO_2	0.12	0.065	0.06	0.10	0.10
V_2O_5	0.004	<0.01	0.001	0.003	0.003
ZnO	0.10	0.009	0.01	0.01	0.07

рению в матрице стекла (Brill, Stapleton, 2012. P. 457). Высокое содержание железа – в среднем 2.52% (таблица, *1*) – играет роль восстановителя меди. Рост кристаллов куприта также зависит от температурной обработки (Henderson, 1985. P. 281). Красные непрозрачные стекла часто содержат значительное количество свинца, который тоже влияет на глубину и насыщенность цвета (Wedepohl, 2003; Gedzevičiūtė et al., 2009. P. 25; Brill, Stapleton, 2012. P. 413). В красной эмали оксид свинца составляет в среднем 25.40% (таблица, *1*). Свинец в такой концентрации, будучи сильным флюсом, понижал температуру плавления кремнезема; медь в составе эмали не только обеспечивала цвет, но также понижала температуру плавления: она могла быть на 100–150 °C ниже температуры плавления (Hill, 2004) белой, синей и бирюзовой эмалей (см. ниже).

Очевидно, в качестве естественной примеси к свинцу в состав эмали вошло олово SnO_2 (0.22%). Оно могло также попасть в стекло с источником красителя – меди, если в качестве него использовался лом изделий из медных сплавов (Shibille et al., 2012). Оксид олова в данном случае не выполнял функцию глушителя, эту задачу решал куприт. Сурьма в красном стекле присутствует лишь как микропримесь (0.03%). Неоднократно отмечено, что контроль степени окисления меди в стеклах с высоким содержанием свинца необходимо оценивать как значительное достижение древних мастеров (Freestone, 1987. P. 182).

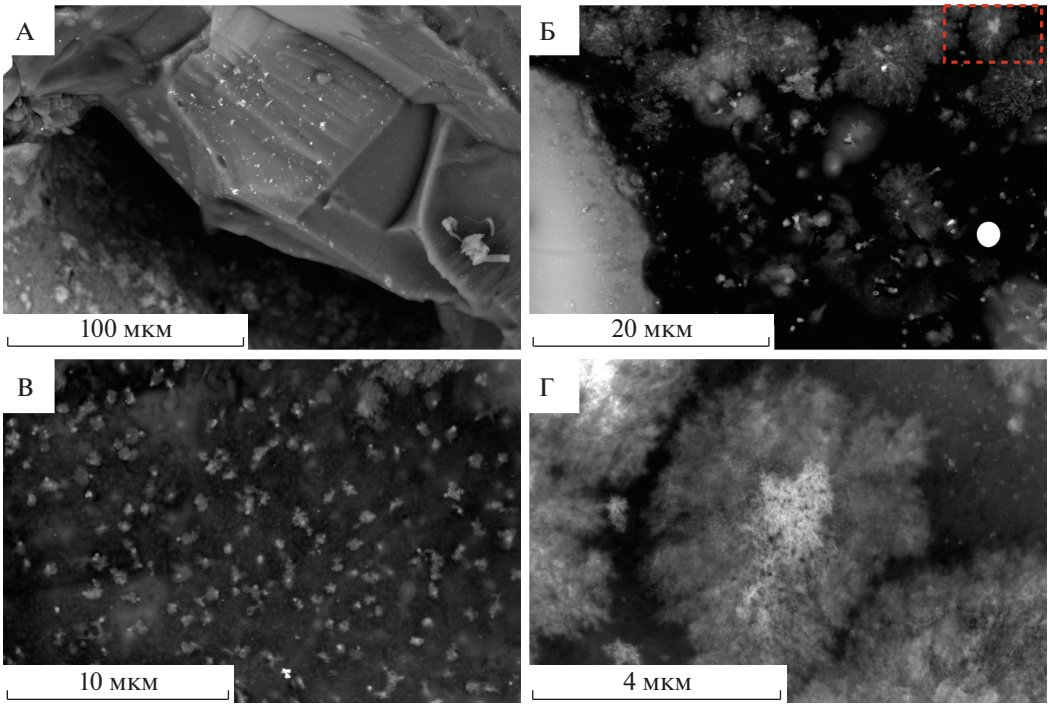

Рис. 5. Дендритные кристаллы куприта в непрозрачной красной эмали. РЭМ изображения в обратно-рассеянных электронах в разных масштабах (А–Г).

Fig. 5. Dendritic cuprite crystals in opaque red enamel. SEM images in back-scattered electrons at different scales (А–Г)

Я. Фристоун обосновал возможность получения красного непрозрачного стекла за счет использования побочных продуктов металлургии – введением в шихту или расплав металлургического шлака. Такое сырье имело множество преимуществ, так как приобретало сбалансированный и прошедший первичный обжиг материал, выполнявший функции флюса, восстановителя и корректора цвета. В конечном счете такой подход должен был снизить стоимость стекла и эмали (Freestone et al., 2003. P. 152; Mecking, 2012; Marii, 2013. P. 16).

Высокая концентрация свинца при низкой концентрации алюминия, магния и калия, находя аналогии с составом византийских браслетов (Bugoi et al., 2013. P. 2886, 2887, tab. 3), характеризуют византийское стекло типа Na_2O (K_2O)–CaO–PbO–SiO_2. Состав близок базовому красному натриево-свинцовому стеклу (Mecking, 2012. P. 651).

Красное непрозрачное стекло известно с древности, широкое распространение оно получило в римском ремесле (Henderson, 1985. P. 281; Freestone, 1987). Позже традиция римского стеклоделия просуществовала до конца византийской эпохи. Такой состав имеют сосуды и украшения из мастерской XIV в. в Коринфе (Brill, Stapleton, 2012. P. 455, 457). В Болгаре на раскопах в районе центрального рынка обнаружены стеклянные перстни подобного состава, атрибутированные как византийская продукция XIV в. (Валиулина, 2022. С. 129).

Помимо красного стекла, проанализирована локальная белесая часть левого лепестка красного крина (рис. 1; таблица, *2*). Результат отражает смешанный состав стекла в этой области. Вероятно, белая эмаль на этом участке перекрыла золотую перегородку и попала на красное стекло, в процессе расплава произошла диффузия. Это может быть связано с особенностью сурьмы, содержащейся в белой эмали. После воздействия высоких температур, при застывании она расширяется, и расплав с ее участием несколько увеличивается в объеме.

Косвенную информацию о возможности такой накладки поверх золотой перегородки можно найти в тексте Теофила. Подробно описывая процесс создания перегородчатой эмали – финифти (Теофил, 2008. Глава LIII. О финифти), автор посвящает отдельную главу полировке финифти (Теофил, 2008. Глава LIV), где, в частности, пишет: “Тщательно натирай финифть на ровном камне песчанике с водой, пока повсюду равномерно не обнаружится золото” (Теофил, 2008. С. 300).

В отличие от красной, эмали белого, синего и бирюзового цветов (таблица, *3–5*) имеют состав, не характерный для стекла XIII в. – как на уровне

основных стеклообразующих компонентов, так и технологических добавок.

Все они относятся к типу $Na_2O–CaO–SiO_2$ и содержат оксид калия в низкой концентрации, типичной для стекла, изготовленного на основе природной соды. Синюю и бирюзовую эмаль отличает и низкое содержание оксида магния, также характерное для содового стекла (0.58 и 0.64%); в белой содержание MgO выше – в среднем 2.21% (таблица, *3*; об этом см. ниже). Однако к XIII в., когда была изготовлена подвеска, природная сода не используется в стеклоделательном производстве уже более трех веков. В VIII–IX вв. постепенно переходят на зольное стекло мастерские Сиро-палестинского региона, ранее работавшие на природной соде (Phelps et al., 2016; 2017); в Египте этот переход происходит, вероятно, в период между 868 и 968–969 гг. (Whitehouse, 2002). Других центров, вариших стекло на основе природной соды, к этому времени не существовало.

Стекло белого, синего и бирюзового цветов близко содовому римского времени и по содержанию прочих компонентов, характеризующих основной состав – прежде всего, по геохимическим характеристикам песка. Состав белой непрозрачной эмали отличает низкое содержание кальция, алюминия, железа и титана, характерное для стекла конца I–III – первой половины IV в., которое обесцвечивалось сурьмой (группа 4 по Foy et al., 2004) и которое считается египетским (Barfod et al., 2020, там же см. ссылки на литературу). От стекла группы 4 исследуемую эмаль отличает лишь более низкое содержание натрия. Синее стекло ближе всего по составу "римскому" левантийского производства (см., например, Foster, Jackson, 2009), хотя точно сопоставить его с неокрашенным довольно сложно из-за присутствия элементов, попавших в стекло с кобальтовым сырьем. Бирюзовая эмаль сочетает признаки стекла двух упомянутых выше групп, при этом присутствие марганца и сурьмы одновременно также очень характерно для бирюзового стекла римского времени: в качестве основы для его окрашивания римские мастера смешивали, как правило, вторично используемое стекло, обесцвеченное марганцем и сурьмой (Paynter et al., 2015).

Эмали всех трех цветов – белая, синяя и бирюзовая – заглушены соединениями сурьмы (в среднем 3.30, 1.74 и 1.25%; таблица, *3–5*). Использование в стеклоделательном производстве сурьмы прекращается не позднее начала V в. (Cholakova, Rehren, 2018. P. 65); на протяжении IV в. ее постепенно заменяют олово (в качестве глушителя) и марганец (в качестве обесцвечивателя).

Процесс получения кристаллов антимоната в древних и средневековых стеклах в настоящее время активно изучается не только аналитически, но и экспериментально (Lahlil et al., 2008; Drünert et al., 2018). В результате установлено, что глушение стекла сурьмой достигалось двумя способами: ее введением в прозрачное базовое стекло типа $Na_2O–CaO–SiO_2$ с последующей кристаллизацией расплава за счет формирования антимоната кальция $Ca_2Sb_3O_6$ или $Ca_2Sb_3O_7$. По второму варианту, также подтвержденному экспериментально, глухое стекло эмали получали добавкой в прозрачное стекло основного состава уже предварительно подготовленного антимоната. В нашем изделии по первому рецепту прямой кристаллизацией антимонатом кальция в процессе плавления достигнута непрозрачность синей и бирюзовой эмалей. Исследование непрозрачных стеклянных мозаик из Древней Мессены I – IV вв., содержащих антимонаты кальция, позволило сделать вывод, что прямая кристаллизация наиболее точно воспроизводит ранние стеклянные изделия (Drünert et al., 2018. P. 4799).

Второй вариант демонстрирует белая эмаль, ее состав включает относительно высокий процент оксида магния – более 2.20% (таблица, *3*), в отличие от синей и бирюзовой эмалей, где его доля всего 0.57 и 0.61%, при близких значениях оксида кальция во всех трех эмалях (таблица, *4, 5*). Картирование химических элементов по результатам анализа белой эмали показало высокую положительную корреляцию магния, сурьмы и кальция (рис. 4), эти особенности можно объяснить добавкой в исходную матрицу содово-кальциевого стекла готового антимонида магния – Mg_2Sb_3. Хронологическим пределом такой технологии использования сурьмы считается IV в. н.э., когда глушитель антимонат был заменен оксидами олова как в западном, так и в восточном Средиземноморье (Tite et al., 2008).

Магний мог попадать в стекло и со стибином, происходящим из богатой магнием породы. Стибин, как и антимонид магния, мог являться источником глушителя (сурьмы) в белом стекле (Nenna, Gratuze, 2009. P. 201). Примеры заглушенного сурьмой белого стекла с повышенным содержанием магния встречены среди римских эмалей, сосудов римского времени, изготовленных в технике миллефиори, и украшений раннего железного века (Henderson, 1991. P. 288; Nenna, Gratuze, 2009). Таким образом, получается, что и высокое содержание магния в белом стекле, заглушенном сурьмой – признак, наиболее типичный для римского времени.

Наконец, типичен для римской традиции производства и окрашивания стекла состав синей эмали и, прежде всего, характер кобальтового красителя. Синяя эмалевая окружность центрального крина окрашена 0.13% (рис. 2; таблица, *4*) оксида кобальта, это достаточно большая кон-

центрация, учитывая высокую активность кобальта-красителя, в стекле и глазури – его действие дает сильный голубой эффект уже при 0.01% (Callmer, Henderson, 1991; Галибин, 2001. С. 37). Кобальт, благодаря характерным сопутствующим элементам, указывает на географию рудных источников содержащих его минералов. В настоящее время существует значительное число публикаций, посвященных минеральной природе кобальта, взаимосвязи между его сырьем и обработкой, международной торговле этим востребованным пигментом (библиографию см.: Colomban et al., 2021). Изменения химического состава кобальтового красителя, прежде всего соотношения кобальта с цинком и никелем, позволили установить этапы в его ремесленном использовании в позднем античном времени и в раннем Средневековье (Gratuze et al., 2018). Римские стекла характеризует соотношение CoO/NiO > 24. Затем, с IV в. до VII в. происходит значительное снижение этого значения. В VIII в. в Восточном Средиземноморье преобладает новый тип кобальтового сырья иной природы: одна из характерных черт исламского содового стекла – выраженная положительная корреляция кобальта с цинком (Gratuze et al., 2018. P. 122). При этом, несмотря на меняющийся во времени состав одного из самых популярных красителей Средневековья и, возможно, открытие новых месторождений кобальтового красителя, содержащих никель, непрерывная рециркуляция древнего стекла привела, вероятно, к сохранению более ранних типов кобальта в стеклоделии в течение первого тысячелетия н.э. В синей эмали подвески-реликвария соотношение CoO/NiO = 24.38, т.е. характерное для римского стекла. Причем кобальтовый краситель в эмали подвески содержит также железо (1.03%), марганец (0.37%) и медь (0.30%) (Colomban et al., 2021); в римском стекле кобальт сопровождает эта же свита элементов.

Бирюзовая глухая эмаль заполняет уголок под красным трилистником-кринoм в центре композиции (рис. 1). Красителем выступает медь (окислительная атмосфера образует оксид двухвалентной меди (в среднем 3.15%), который сообщает стеклу бирюзовый цвет, глушителем является антимонат кальция, стекло содержит высокий процент сурьмы – 1.25% (таблица, *5*). Микропримесь цинка (0.10%) сопутствует меди. Состав бирюзовой эмали также очень близок стеклу римского времени, в частности он встречается среди мозаик (см., например, Paynter et al., 2015).

И в синем кобальтовом стекле (Sb_2O_3 1.73%), и в бирюзовом присутствие значительной концентрации сурьмы, сообщая непрозрачность, не влияет на чистоту и яркость цвета эмали (Gedzevičiūtė et al., 2009. P. 28). То есть состав белой, синей и бирюзовой эмалей по комплексу признаков типичен для стекла римского времени.

В более поздний период подобное стекло встречается существенно реже. В частности, сурьма, как показывают материалы европейских памятников, спорадически встречается наряду с оловом и в средневековых стеклах, например, в византийском (Gedzevičiūtė et al., 2009). Практически полную аналогию состава белой эмали квадрифолия показывает Чезаро Фиори в стекле мозаичной плитки из базилики Сан Северо в Равенне (Fiori, 2013. P. 37, table 2a). В качестве красителя и глушителя она использована в импортных стеклянных изделиях Старой Ладоги, Киева, Новогрудка (Галибин, 2001. Табл. 20, № 1346, 1919, 2292). При этом В.А. Галибин обращал внимание на то, что в стеклоделии Древней Руси X–XIII вв. сурьма не употреблялась. Специально сурьма использовалась только в центрах стеклоделия, работавших на природной соде (Галибин, 2001. С. 42). Кроме того, ранние типы кобальтового сырья фиксируются в стекле в течение всего первого тысячелетия н.э. и позже (см. ниже).

Вероятно, не во всех случаях данные особенности более позднего, по сравнению с римским, стекла могут объясняться континуитетом римской и византийской технологии стеклоделия.

Известно, что до конца XII в. римское цветное стекло широко использовалось в средневековом стеклоделии как источник красителя. Сводка данных по этой теме опубликована Я. Фристоуном (Freestone, 2015), ниже мы приводим данные из его работы.

В XII в. витражное стекло окрашивалось в синий цвет при помощи римской мозаичной смальты, так как в это время европейские источники кобальта еще не разрабатывались (Freestone, 2015. P. 36, 37, там же см. ссылки на литературу). Это заключение обосновано как данными аналитического изучения витражей из Йорк-Минстера и Сен-Дени (Freestone, 2015, см. ссылки на литературу), так и находит подтверждение в письменных источниках. В трактате “О различных искусствах” практику применения мозаик и осколков цветных сосудов для окрашивания стекла, в частности витражей, упоминает Теофил: “В старинных домах язычников имеются мозаики из различных видов стекла, а именно: белое, черное, зеленое, шафрановое, сапфировое, красное, пурпурное, и стекло это непрозрачное, но плотное, как мрамор, имеет оно подобие квадратных камней из коих, изготавливают финифти на золоте, серебре и меди ... там также имеются сосуды тех же цветов, их собирают франки, опытнейшие в таком деле люди, сапфировое стекло они выплавляют в своих печах и добавляют немного светлого и белого стекла и изготавливают ценнейшие плитки сапфирового стекла, весьма употребительные для окон. Подобным же образом

они также варят пурпурное и зеленое стекло" (Теофил, 2008. Кн. 2, Гл. XII).

Наиболее широкое применение римская смальта нашла именно в эмальерном производстве эпохи Средневековья. Целый ряд исследований показал, что средневековые эмали синего, зеленого, желтого и белого цветов идентичны по составу римскому непрозрачному стеклу. Они изготовлены из стекла на основе природной соды и содержат глушители на основе сурьмы (Freestone, 2015. P. 37, 38). В это же время в Северо-Западной Европе известна красная эмаль, окрашенная медью, полученная из современного стекла. Это позволяет связывать использование римских мозаик с отсутствием в арсенале эмальеров подходящих красителей некоторых цветов (Freestone, 2015).

Сама традиция использования смальты в эмальерном производстве, очевидно, берет начало в римское время. Считается, что склад мозаичных тессер II в. н.э., обнаруженный в Уэст Клэктоне (Британия), принадлежал эмальеру – на это указывает цветовая гамма находок, типичная для романо-британских эмалей (Paynter et al., 2015; Bayley, 2015. P. 186).

Изучение лиможских эмалей XII–XIII вв. позволило установить время, когда в Западной Европе прекращается практика использования римских мозаик для нужд эмальерного производства. Примерно до 1190 г. все проанализированные эмали имеют состав, типичный для римского стекла; с 1190 до 1230 г. используется смесь средневекового и римского стекла; с 1230 г. все проанализированное стекло – современное эмалевым изделиям, вероятно, импортное средиземноморское. Замена римской смальты на современное стекло в Лиможе примерно совпадает по времени с финалом практики окрашивания витражей римскими тессерами. Одной из возможных причин этому видится растущий в Европе спрос как на витражи, так и на сырье для эмальерного производства, связанный с его активным развитием (Freestone, 2015. P. 37, 38).

Таким образом, есть все основания полагать, что белая, синяя и бирюзовая эмали, использованные при производстве найденного в Новгороде квадрифолия, были получены из мозаичной смальты римского времени. Такая практика была, очевидно, широко распространена в рассматриваемый период в Западной Европе. Учитывая эти данные, производство эмали можно увязать с территорией Римской империи и зонами ее влияния, где могли сохраниться римские мозаики, использованные как сырье для производства эмали. Возможно, ее изготовили византийские мастера. Однако, учитывая тот факт, что эмали в рассматриваемый период могли импортироваться на Русь[1], полученные данные не дают информации о месте производства самой подвески.

Дата подвески, выпавшей в культурный слой в начале XIII в., хорошо согласуется с данными об использовании римской смальты для получения эмалей до конца XII – начала XIII в.; очевидно, ее производство приходится на самый финал периода применения данной практики. При этом, однако, нельзя исключить, что там, где она была изготовлена, ритмы технологического развития могли отличаться от лиможских.

Красная эмаль, вероятно, синхронна времени выполнения самого украшения, что также хорошо согласуется с данными по европейским эмалям. Стоит, однако, отметить, что красное непрозрачное стекло римского времени часто имеет состав, типичный для зольного стекла (это обусловлено технологическими добавками, способствующими цветообразованию), поэтому отличить его от византийского довольно сложно. Однако следовые концентрации в стекле оксида сурьмы говорят, скорее, об использовании для красной эмали средневекового стекла. В римское время в красном стекле оксид сурьмы чаще всего присутствует в десятых долях процента.

Исходя из более низкой температуры расплава красной эмали по сравнению с содовыми – белой, бирюзовой и синей, нужно было бы предположить поэтапное заполнение золотых ячеек вставки квадрифолия, где красная эмаль должна быть последней. Этот способ сообщает Теофил (Теофил, 2008; Макарова, 1997. С. 55). Но в нашем случае мы имеем пример одновременного заполнения и расплава всех четырех эмалей. На такой порядок указывают непреднамеренное присутствие белой эмали на левом лепестке красного крина, где она приобрела более темный цвет в результате диффузии (рис. 2; таблица, *2*), а также неровный, преимущественно темно-красный цвет, как следствие воздействия повышенной температуры в печи. Менее выраженное попадание красной эмали на белую можно видеть под правым лепестком крина (рис. 2).

Результаты аналитического исследования эмали представили образец высокой культуры ремесла, которая уходит корнями в римскую производственную традицию, обнаруживая удивительный континуитет в течение многих столетий от Рима до Византии.

Высокое качество четырехцветных эмалей дает исследователям основания считать их ранними в византийском искусстве (Макарова, 1975. С. 57), предполагая их византийское происхождение.

[1] Выражаем благодарность И.А. Стерлиговой (Государственный институт искусствознания, Москва) за любезную консультацию.

В литературе традиционно называются три византийских центра производства перегородчатых эмалей: Константинополь (Byzantium, 2008), Коринф (Brill, Stapleton, 2012), Салоники (Antonaras, 2013). Хотя география мастерских внутри империи должна быть значительно шире.

Еще сложнее определить центры эмальерного искусства на всем пространстве влияния византийской культуры. В этой связи особенное значение и потенциал для дальнейших исследований имеют материалы городов Древней Руси: Киева, Чернигова, Владимира, Старой Рязани, Новгорода и других. Большая определенность отличает Грузию, где отмечено значительное число изделий в технике перегородчатой эмали, среди них есть подписные датированные образцы, установлено национальное стилевое своеобразие, некоторые особенности технологии (Amiranaschwili, 1971; Райс, 2002). Сложность определения места и времени изготовления эмалей обусловлена не только устойчивостью и каноничностью технологических и стилистических традиций изготовления, но и долгой жизнью поистине драгоценных изделий. Конструкция и крепление вставок на панели и оклады икон оставляли возможность их изъятия из старой, возможно, пришедшей в негодность основы и переноса на новое изделие. Это была довольно распространенная практика (Amiranaschwili, 1971; Byzantium..., 2008; Минасян, 2014. С. 345). Эмалевую вставку на новгородском квадрифолии тоже можно было бы заподозрить во вторичном использовании, учитывая ее не совсем ровное расположение на золотой основе (рис. 1), при том, что все остальное в ее исполнении безупречно. Но миниатюрный эмалевый медальон с трилистником в центре составляет единый гармоничный ансамбль с декором золотой основы, где ведущая роль принадлежит трилистникам – кринам и производным от них пятилепестковым пальметтам (рис. 1). В заключение, отвечая на едва ли не главный вопрос о происхождении подвески с эмалевым медальоном, можно предположить три варианта ответа: первый – подвеска с эмалевой вставкой является византийским импортом; второй – вставка была выполнена в одной из столичных (?) мастерских Византии и привезена на Русь, где украсила золотой квадрифолий местной работы; третий – вставка, как и все изделие, произведена греческими мастерами в одном из русских городов. При этом неместное (вероятно, византийское) производство самой эмали сомнений не вызывает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Валиулина С.И. Стеклянные перстни Болгара (по материалам CXCII–CLXXIX раскопов 2013–2017 гг.) // Российская археология. 2022. № 2. С. 120–133.

Галибин В.А. Состав стекла как археологический источник. СПб.: Петербургское Востоковедение, 2001. 216 с.

Даркевич В.П. Светское искусство Византии. Произведения византийского художественного ремесла в Восточной Европе X–XIII века. М.: Искусство, 1975. 350 с.

Кондаков Н.П. Русские клады: исследование древностей великокняжеского периода. Т. 1. СПб.: Императорская Археологическая комиссия, 1896. 214 с.

Макарова Т.И. Перегородчатые эмали Древней Руси. М.: Наука, 1975. 127 с.

Макарова Т.И. Украшения с перегородчатой эмалью // Древняя Русь. Быт и культура / Отв. ред. Б.А. Колчин, Т.И. Макарова. М.: Наука, 1997. С. 55–60.

Минасян М.С. Металлообработка в древности и Средневековье. СПб.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 2014. 472 с.

Новаковская-Бухман С.М. Клады Древней Руси в собрании Русского музея. СПб.: Palace Editions, 2015. 96 с.

Райс Д.Т. Искусство Византии. М.: Слово, 2002. 256 с.

Смирнова Г.И., Доманский Я.В. Древнее искусство. Л.: Аврора, 1974. 195 с.

Теофил. О различных искусствах // Книга тайн. Секреты мастерства. СПб.: Азбука-Классика, 2008. С. 169–374.

Amiranaschwili S. Kunstschätze Georgiens. Prague: Artia, 1971. 175 S.

Antonaras A. The Production and Uses of Glass in Byzantine Thessaloniki // New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass / Eds. Ch. Entwistle, L. James. London: The British Museum, 2013. P. 189–206.

Barfod G.H., Freestone I.C., Lesher C.E., Lichtenberger A., Raja R. 'Alexandrian' glass confirmed by hafnium isotopes // Scientific Reports. 2020. 10. 11322.

Bayley J. Roman enamels and enameling // Glass of the Roman world / Eds. J. Bayley, I. Freestone, K. Jackson. Oxford; Philadelphia: Oxbow books, 2015. P. 178–189.

Brill R.H., Stapleton R.H. Chemical analyses of early Glasses. Vol. 3. The Years 2000–2011, Reports, and Essays. Corning, New York: The Corning Museum of Glass, 2012. 727 p.

Bugoi R., Poll I., Manucu-Adamesteanu Gh., Neelmaeijer C., Eder F. Investigations of Byzantine glass bracelets from Nufăru, Romania using external PIXE–PIGE methods // Journal of Archaeological Science. 2013. Vol. 40, iss. 7. P. 2881–2891.

Byzantium 330–1453 / Eds. R. Cormack, M. Vassilaki. London: Royal Academy of Arts, 2008. 494 p.

Callmer J., Henderson J. Glassworking at Åhus, S. Sweden (Eighth century AD) // Laborativ Arkeologi. 5. Stockholm: Stockholm University, Archaeological research Laboratory, 1991. P. 143–154.

Cholakova A., Rehren T. A Late Antique manganese-decolourised glass composition: Interpreting patterns and mechanisms of distribution // Things that Travelled: Mediterranean Glass in the First Millennium CE / Ed. D. Rosenow et al. London: University College London Press, 2018. P. 46–71.

Colomban P., Kirmizi B., Franci G.S. Cobalt and Associated impurities in Blue (and Green) Glass, Glaze and Enamel: Relationships between Raw Materials Processing, Composition, Phases and International Trade // Minerals. 2021. 11. 633. https://doi.org/10.3390/min11060633

Degryse P., Shortland A.J., Dillis S., van Ham-Meert A., Leeming P. Isotopic evidence for the use of Caucasian antimony in Late Bronze Age glass making // Journal of Archaeological Science. 2020. Vol. 120. 105195.

Drünert F., Palamara E., Zacharias N., Wondraczek L., Möncke D. Ancient Roman nano-technology: Insight into the manufacture of mosaic tesserae opacified by calcium antimonate // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38, iss. 14. P. 4799–4805.

Fiori C. Mosaic Tesserae from the Basilica of San Severo find Glass Production in Classe, Ravenna, Italy // New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass / Eds. Ch. Entwistle, L. James. London: The British Museum, 2013. P. 33–41.

Foster H.E., Jackson C.M. The composition of 'naturally coloured' late Roman vessel glass from Britain and the implications for models of glass production and supply // Journal of Archaeological Science. 2009. Vol. 36, iss. 2. P. 189–204.

Foy D., Thirion-Merle V., Vichy M. Contribution à l'étude des verres antiques décolorés à l'antimoine // Revue d'Archéométrie. 2004. Vol. 28. P. 169–177.

Freestone I.C. Composition and microstructure of early opaque red glass // Early Vitreous Materials / Eds. M. Bimson, I.C. Freestone. London: British Museum, 1987 (British Museum. Occasional Paper; 56). P. 173–190.

Freestone I.C. The Recycling and Reuse of Roman Glass: Analytical Approaches // Journal of Glass Studies. 2015. Vol. 57. P. 29–40.

Freestone I.C., Stapleton C.P., Rigby V. The production of red glass and enamel in the Late Iron Age, Roman and Byzantine periods // Through the glass brightly: studies in Byzantine and Medieval Art and Archaeology presented to David Buckton / Ed. C. Entwistle. Oxford: Oxbow, 2003. P. 142–154.

Gedzevičiūtė V., Welter N., Schüssler U., Weiss C. Chemical composition and colouring agents of Roman mosaic and millefiori glass, studied by electron microprobe analysis and Raman microspectroscopy // Archaeological and Anthropological Sciences. 2009. 1. P. 15–29.

Gratuze B., Pactat I., Schibille N. Changes in the Signature of Cobalt Colorants in Late Antique and Early Islamic Glass Production // Minerals. 2018. 8. 225.

Henderson J. The raw materials of early glass production // Oxford Journal of Archaeology. 1985. Vol. 4, iss. 3. P. 267–291.

Lahlil S., Biron I., Galoisy L., Morin G. Rediscovering ancient glass technologies through the examination of opacifier crystals // Applied Physics A. 2008. 92, 1. P. 109–116.

Marii F. Glass Tesserae from the Petra Church // New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass / Eds. Ch. Entwistle, L. James. London: The British Museum, 2013. P. 11–24.

Matin M., Pollard A.M. From ore to pigment: A description of the minerals and an experimental study of cobalt ore processing from the Kāshān Mine, Iran // Archaeometry. 2017. Vol. 59, iss. 4. P. 731–746.

Mecking O. Medieval lead glass in Central Europe // Archaeometry. 2013. Vol. 55, iss. 4. P. 640–662.

Paynter S., Kearns T., Cool H., Chenery S. Roman coloured glass in the Western provinces: The glass cakes and tesserae from West Clacton in England // Journal of Archaeological Science. 2015. Vol. 62. P. 66–81.

Phelps M. An investigation into technological change and organisational developments in glass production between the Byzantine and Early Islamic Periods (7th–12th centuries) focussing on evidence from Israel: Thesis submitted to University College London for the degree of Doctor of Philosophy in Archaeology. London, 2017. 539 p.

Phelps M., Freestone I.C., Gorin-Rosen Y., Gratuze B. Natron glass production and supply in the late antique and early medieval Near East: The effect of the Byzantine-Islamic transition // Journal of Archaeological Science. 2016. Vol. 75. P. 57–71.

Röhrs S., Meek A., Entwistle C. A Scientific Study of Late Antique Glass Pendants in the British Museum // New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass / Eds. Ch. Entwistle, L. James. London: The British Museum, 2013. P. 178–188.

Schibille N., Degryse P., Corremans M., Specht C.G. Chemical Characterisation of Glass Mosaic Tesserae from Sixth-Century Sagalassos (South-West Turkey): Chronology and Production Techniques // Journal of Archaeological Science. 2012. Vol. 39, iss. 5. P. 1480–1492.

Tite M.S., Freestone I., Mason R., Molera J., Vendrel-Saz M., Wood N. Lead Glazes in Antiquity – methods of Production and Reasons for use // Archaeometry. 1998. Vol. 40, iss. 2. P. 241–260.

Wedepohl K.H. Glas in der Antike und im Mittelalter. Geschichte eines Werkstoffs. Stuttgart: Schweizerbart, 2003. 227 S.

Weiß C., Schüssler U. Kameoglasfragmente im Martin von Wagner Museum der Universität Würzburg und im Allard Pierson Museum Amsterdam // Jahrbuch des Deutschen Archaologischen Instituts. 2000. 115. S. 199–251.

Whitehouse D. The transition from natron to plant ash in the Levant // Journal of Glass Studies. 2002. Vol. 44. P. 193–196.

ENAMELED MEDALLION OF THE GOLD PENDANT FROM VELIKY NOVGOROD

Svetlana I. Valiulina[a,#], Olga S. Rumyantseva[b,##], Ekaterina S. Vaschenkova[c,###], Pavel A. Volkov[c,####], Artem M. Ismagulov[c,#####], Anastasia N. Mandrykina[c,######], Vasily M. Retivov[c,#######], Anton G. Kulikov[d,########], Elena Yu. Tereschenko[e,#########], and Ekaterina B. Yatsishina[c,##########]

[a] *Kazan Federal University, Kazan, Russia*

[b] *Institute of Archaeology RAS, Moscow, Russia*

[c] *Kurchatov Institute National Research Centre and Kurchatov Institute–IREA, Moscow, Russia*

[d] *Shubnikov Institute of Crystallography at Federal Research Centre of Crystallography and Photonics RAS, Moscow, Russia*

[e] *Federal Research Centre of Crystallography and Photonics RAS, Kurchatov Institute National Research Centre, Kurchatov Institute–IREA, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: svaliulina@inbox.ru*

[##] *E-mail: o.roumiantseva@mail.ru*

[###] *E-mail: e katerina2708@mail.ru*

[####] *E-mail: volkov.pavel.msu@yandex.ru*

[#####] *E-mail: ismagulov.art@mail.ru*

[######] *E-mail: mandrykina_av@mail.ru*

[#######] *E-mail: vasilii_retivov@mail.ru*

[########] *E-mail: ontonic@gmail.com*

[#########] *E-mail: elenatereschenko@yandex.ru*

[##########] *E-mail: yacekaterina@yandex.ru*

The article analyzes an inset made in the technique of cloisonné enamel on a gold pendant of the early 13th century from Veliky Novgorod. The enamel compositions were analyzed by scanning electron microscopy with energy dispersive X-ray microanalysis and laser ablation inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. The technology and composition of red enamel correspond to the Byzantine artisan tradition. Enamels of white, blue and turquoise colours have a composition typical of Roman soda glass and contain antimony used in glass manufacturing till the 4th century BC. This makes it possible to conclude that Roman tesserae were reused as a raw material for them – a practice attested in European enamel industry until the late 12th – early 13th century. Three options of the origin of the object can be assumed. First, the pendant with the enamel inset is a Byzantine import. Second, the enamel inset could be made in a Byzantine workshop and later brought to Russia, where it adorned a locally made gold cross. Third, the inset together with the whole object was made by Greek craftsmen in one of the Rus towns. In any case, imported (probably Byzantine) enamel was used in manufacturing the object under analysis.

Keywords: Veliky Novgorod, 13th century, cloisonné enamel, electron microscopy, X-ray fluorescence mapping, atomic emission spectroscopy, chemical composition, technology, Byzantium.

REFERENCES

Amiranaschwili S., 1971. Kunstschätze Georgiens. Prague: Artia. 175 p.

Antonaras A., 2013. The Production and Uses of Glass in Byzantine Thessaloniki. *New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass*. Ch. Entwistle, L. James, eds. London: The British Museum, pp. 189–206.

Barfod G.H., Freestone I.C., Lesher C.E., Lichtenberger A., Raja R., 2020. 'Alexandrian' glass confirmed by hafnium isotopes. *Scientific Reports*, 10, 11322.

Bayley J., 2015. Roman enamels and enameling. *Glass of the Roman world*. J. Bayley, I. Freestone, K. Jackson, eds. Oxford; Philadelphia: Oxbow books, pp. 178–189.

Brill R.H., Stapleton R.H., 2012. Chemical analyses of early Glasses, 3. The Years 2000–2011, Reports, and Essays. Corning, New York: The Corning Museum of Glass. 727 p.

Bugoi R., Poll I., Manucu-Adamesteanu Gh., Neelmaeijer C., Eder F., 2013. Investigations of Byzantine glass bracelets from Nufăru, Romania using external PIXE–PIGE methods. *Journal of Archaeological Science*, vol. 40, iss. 7, pp. 2881–2891.

Byzantium 330–1453. R. Cormack, M. Vassilaki, eds. London: Royal Academy of Arts, 2008. 494 p.

Callmer J., Henderson J., 1991. Glassworking at Åhus, S. Sweden (Eighth century AD). *Laborativ Arkeologi*, 5. Stockholm: Stockholm University, Archaeological research Laboratory, pp. 143–154.

Cholakova A., Rehren T., 2018. A Late Antique manganese-decolourised glass composition: Interpreting patterns and mechanisms of distribution. *Things that Travelled: Mediterranean Glass in the First Millennium CE*. D. Rosenow, ed. London: University College London Press, pp. 46–71.

Colomban P., Kirmizi B., Franci G.S., 2021. Cobalt and Associated impurities in Blue (and Green) Glass, Glaze and Enamel: Relationships between Raw Materials Processing, Composition, Phases and International Trade. *Minerals*, 11, 633. DOI: 10.3390/min11060633

Darkevich V.P., 1975. Svetskoe iskusstvo Vizantii. Proizvedeniya vizantiyskogo khudozhestvennogo remesla v Vostochnoy Evrope X–XIII veka [Secular art of Byzantium. Works of Byzantine artistic crafts in Eastern Europe in the 10th–13th centuries]. Moscow: Iskusstvo. 350 p.

Degryse P., Shortland A.J., Dillis S., van Ham-Meert A., Leeming P., 2020. Isotopic evidence for the use of Caucasian antimony in Late Bronze Age glass making. *Journal of Archaeological Science*, 120, 105195.

Drünert F., Palamara E., Zacharias N., Wondraczek L., Möncke D., 2018. Ancient Roman nano-technology: Insight into the manufacture of mosaic tesserae opacified by calcium antimonate. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, iss. 14, pp. 4799–4805.

Fiori C., 2013. Mosaic Tesserae from the Basilica of San Severo find Glass Production in Classe, Ravenna, Italy. *New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass*. Ch. Entwistle, L. James, eds. London: The British Museum, pp. 33–41.

Foster H.E., Jackson C.M., 2009. The composition of 'naturally coloured' late Roman vessel glass from Britain and the implications for models of glass production and supply. *Journal of Archaeological Science*, vol. 36, iss. 2, pp. 189–204.

Foy D., Thirion-Merle V., Vichy M., 2004. Contribution à l'étude des verres antiques décolorés à l'antimoine. *Revue d'Archéométrie*, 28, pp. 169–177.

Freestone I.C., 1987. Composition and microstructure of early opaque red glass. *Early Vitreous Materials*. M. Bimson, I.C. Freestone, eds. London: British Museum, pp. 173–190. (British Museum. Occasional Paper, 56).

Freestone I.C., 2015. The Recycling and Reuse of Roman Glass: Analytical Approaches. *Journal of Glass Studies*, 57, pp. 29–40.

Freestone I.C., Stapleton C.P., Rigby V., 2003. The production of red glass and enamel in the Late Iron Age, Roman and Byzantine periods. *Through the glass brightly: studies in Byzantine and Medieval Art and Archaeology presented to David Buckton*. C. Entwistle, ed. Oxford: Oxbow, pp. 142–154.

Galibin V.A., 2001. Sostav stekla kak arkheologicheskiy istochnik [Glass composition as an archaeological source]. St. Petersburg: Peterburgskoe Vostokovedenie. 216 p.

Gedzevičiūtė V., Welter N., Schüssler U., Weiss C., 2009. Chemical composition and colouring agents of Roman mosaic and millefiori glass, studied by electron microprobe analysis and Raman microspectroscopy. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1, pp. 15–29.

Gratuze B., Pactat I., Schibille N., 2018. Changes in the Signature of Cobalt Colorants in Late Antique and Early Islamic Glass Production. *Minerals*, 8, 225.

Henderson J., 1985. The raw materials of early glass production. *Oxford Journal of Archaeology*, vol. 4, iss. 3, pp. 267–291.

Kondakov N.P., 1896. Russkie klady: issledovanie drevnostey velikoknyazheskogo perioda [Rus hoards: A Study in the antiquities of the Grand Dukes period], 1. St. Petersburg: Imperatorskaya Arkheologicheskaya komissiya. 214 p.

Lahlil S., Biron I., Galoisy L., Morin G., 2008. Rediscovering ancient glass technologies through the examination of opacifier crystals. *Applied Physics A*, 92, 1, pp. 109–116.

Makarova T.I., 1975. Peregorodchatye emali Drevney Rusi [Cloisonné enamels of Rus]. Moscow: Nauka. 127 p.

Makarova T.I., 1997. Jewellery with cloisonné enamel. *Drevnyaya Rus'. Byt i kul'tura [Rus. Life and culture]*. B.A. Kolchin, T.I. Makarova, eds. Moscow: Nauka, pp. 55–60. (In Russ.)

Marii F., 2013. Glass Tesserae from the Petra Church. *New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass*. Ch. Entwistle, L. James, eds. London: The British Museum, pp. 11–24.

Matin M., Pollard A.M., 2017. From ore to pigment: A description of the minerals and an experimental study of cobalt ore processing from the Kāshān Mine, Iran. *Archaeometry*, vol. 59, iss. 4, pp. 731–746.

Mecking O., 2013. Medieval lead glass in Central Europe. *Archaeometry*, vol. 55, iss. 4, pp. 640–662.

Minasyan M.S., 2014. Metalloobrabotka v drevnosti i Srednevekov'e [Metalworking in antiquity and the Middle Ages]. St. Petersburg: Izdatel'stvo Gosudarstvennogo Ermitazha. 472 p.

Novakovskaya-Bukhman S.M., 2015. Klady Drevney Rusi v sobranii Russkogo muzeya [Hoards of Rus in the collection of the Russian Museum]. St. Petersburg: Palace Editions. 96 p.

Paynter S., Kearns T., Cool H., Chenery S., 2015. Roman coloured glass in the Western provinces: The glass cakes and tesserae from West Clacton in England. *Journal of Archaeological Science*, 62, pp. 66–81.

Phelps M., 2017. An investigation into technological change and organisational developments in glass production between the Byzantine and Early Islamic Periods (7th–12th centuries) focusing on evidence from Israel: Thesis submitted to University College London for the degree of Doctor of Philosophy in Archaeology. London. 539 p.

Phelps M., Freestone I.C., Gorin-Rosen Y., Gratuze B., 2016. Natron glass production and supply in the late antique and early medieval Near East: The effect of the Byzantine-Islamic transition. *Journal of Archaeological Science*, 75, pp. 57–71.

Rays D.T., 2002. Iskusstvo Vizantii [Art of Byzantium]. Moscow: Clovo. 256 p.

Röhrs S., Meek A., Entwistle C., 2013. A Scientific Study of Late Antique Glass Pendants in the British Museum. *New Light on Old Glass: Recent Research on Byzantine Mosaics and Glass*. Ch. Entwistle, L. James, eds. London: The British Museum, pp. 178–188.

Schibille N., Degryse P., Corremans M., Specht C.G., 2012. Chemical Characterisation of Glass Mosaic Tesserae from Sixth-Century Sagalassos (South-West Turkey): Chronology and Production Techniques. *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, iss. 5, pp. 1480–1492.

Smirnova G.I., Domanskiy Ya.V., 1974. Drevnee iskusstvo [Ancient art]. Leningrad: Avrora. 195 p.

Teofil, 2008. De diversis artis. *Kniga tayn. Sekrety masterstva [Book of mysteries. Tricks of the trade]*. St. Petersburg: Azbuka-Klassika, pp. 169–374. (In Russ.)

Tite M.S., Freestone I., Mason R., Molera J., Vendrel-Saz M., Wood N., 1998. Lead Glazes in Antiquity – methods of Production and Reasons for use. *Archaeometry*, vol. 40, iss. 2, pp. 241–260.

Valiulina S.I., 2022. Glass finger-rings of Bolgar (based on materials from CXCII, CLXXIX excavation sites of 2013–2017). *Rossiyskaya arkheologiya [Russian archaeology]*, 2, pp. 120–133. (In Russ.)

Wedepohl K.H., 2003. Glas in der Antike und im Mittelalter. Geschichte eines Werkstoffs. Stuttgart: Schweizerbart. 227 p.

Weiß C., Schüssler U., 2000. Kameoglasfragmente im Martin von Wagner Museum der Universität Würzburg und im Allard Pierson Museum Amsterdam. *Jahrbuch des Deutschen Archaologischen Instituts*, 115, pp. 199–251.

Whitehouse D., 2002. The transition from natron to plant ash in the Levant. *Journal of Glass Studies*, 44, pp. 193–196.