

УДК 546.284; 546.06

## СОСТАВ ГУСЕВСКОГО ХРУСТАЛЬНОГО СТЕКЛА СЕРЕДИНЫ XIX В.

А.А. Дроздов<sup>1\*</sup>, М.Н. Андреев<sup>1</sup>, А.В. Чуканова<sup>2</sup>, В.К. Карандашев<sup>3</sup>,  
В.А. Хвостиков<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; <sup>2</sup>Государственный Владимиро-Суздальский музей-заповедник; <sup>3</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН; e-mail: camertus@mail.ru)

**Впервые изучен состав гусевского хрустального стекла середины XIX в., а также его термические и спектральные (рамановские спектры, флуоресценция) свойства. Показано, что стекло принадлежит к группе поташно-известковых силикатных стекол с низким содержанием свинца. Данная рецептура была впервые разработана в центральной Европе во второй половине XVII в. и усовершенствована в начале XVIII в. Продемонстрированы возможности использования портативного рентгенофлуоресцентного анализатора для анализа силикатных стекол.**

**Ключевые слова:** силикатное стекло, история стеклоделия, рентгенофлуоресцентный анализ, рамановская спектроскопия.

В истории стеклоделия заметное место занимает русское художественное стекло XVIII–XIX вв. Историки и искусствоведы подробно изучили формы изделий, способы их обработки и декорирования. Однако состав русских стекол этого периода до сих пор практически не исследован. Это объясняется несколькими причинами. Первая из них – сложность атрибуции изделий из стекла, которые, в отличие от фарфора и фаянса, не было принято маркировать вплоть до конца XIX в. Связывать тот или иной предмет с конкретным предприятием можно лишь на основании изучения письменных источников и искусствоведческого анализа. Многие ценные изделия, например предметы из дворцовых сервизов, неоднократно повторялись в более позднее время (иногда на других стекольных заводах). Будучи безусловно выполненными, они по внешнему виду практически не отличаются от более ранних оригиналов. Ответить на вопрос о времени их создания может лишь химико-технологическая экспертиза. Однако ее использование ограничено, поскольку составы рассматриваемых стекол практически не исследованы. Для решения этой задачи необходимы предметы с точно известным местом и временем изготовления, которые хранятся в музеях. Вторая причина заключается в трудности исследования предметов из музейных собраний. Это связано с тем, что полное физико-химическое исследование включает методы, разрушающие образец.

Для проведения настоящего исследования мы выбрали фрагмент подвеса для канделя-

бра (рис. 1), находящийся в частном собрании (г. Гусь-Хрустальный). По форме, размерам, цвету и характеру обработки поверхности он полностью соответствует подвесам к одному из канделябров, находящихся в Музее хрусталя им. Мальцовых (г. Гусь-Хрустальный) (рис. 2) и представляет собой один из запасных подвесов к этим или аналогичным канделябрам. Изделие датировано серединой XIX в. и выполнено на Гусевской хрустальной фабрике [1]. В настоящей статье представлены результаты комплексного исследования данного фрагмента.

### Экспериментальная часть

Спектры фотолюминесценции и возбуждения образца измеряли при комнатной температуре на люминесцентном спектрометре «Perkin-Elmer LS-55», применяя в качестве источника возбуждения ксеноновую лампу, снабженную монохроматором.

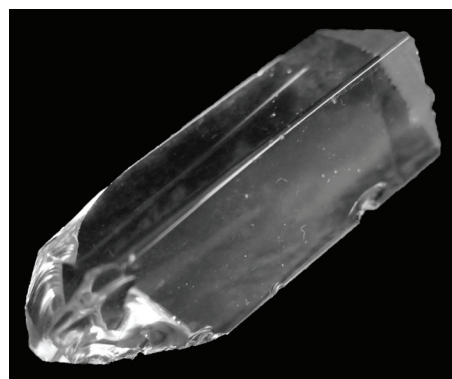


Рис. 1. Фото изученного фрагмента



Рис. 2. Фото канделябра

В работе использовали спектры возбуждения, полученные при  $\lambda_{\text{ex}} = 252$  нм.

Элементный состав образца определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в сочетании с лазерным пробоотбором (ЛА-ИСП-МС) с помощью спектрометра «X-7» («Thermo Scientific») и лазера «UP266 MACRO» («New Wave Research»). Параллельное неразрушающее определение элементного состава образца проведено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (РСФА) с использованием портативного анализатора «X-Met7500» («Oxford Instruments»). Кроме того, фрагмент образца массой ~6 мг был проанализирован методами масс-спектрометрии («X-7», «Thermo Scientific») и атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой («iCAP-6500 Duo», «Thermo Scientific») после его кислотного автоклавного растворения (МС/АЭС-ИСП). Методика анализа аналогична методике, использованной для анализа образцов гранитов и подробно описана в [2]. Исследование термических свойств проводили на dilatометре «Netzsch DIL 402 C» в температурном интервале от 40 до 1000 °С на воздухе со скоростью нагрева 5 град/мин.

Рамановские спектры получены на спектрометре «Renishaw InVia» с возбуждением лазером при  $\lambda = 532$  нм (разрешение 1–2  $\text{см}^{-1}$  в интервале 300–1400  $\text{см}^{-1}$ ).

## Обсуждение результатов

Исследуемый образец представляет собой хорошо полированную треугольную призму длиной 6 см с размерами сторон 15, 16 и 20 мм. Внешне стекло выглядит однородным без свилей, камней и пузырьков. Температура стеклования, определенная dilatометрически, составляет 582 °С, а температура размягчения – 646 °С.

Результаты элементного анализа фрагмента подвеса методами ЛА-ИСП-МС, МС/АЭС-ИСП и РСФА, приведены в табл. 1. Данные методы в последнее время широко используются в элементном анализе, в том числе и для исследования исторических стекол [3]. Результаты анализа этого фрагмента, проведенного методами ЛА-ИСП-МС и МС/АЭС-ИСП, хорошо согласуются между собой. В табл. 1 приведены средние значения содержания в стекле основных элементов, кроме Si и В, определение которых возможно только методом ЛА-ИСП-МС. При использовании метода МС/АЭС-ИСП эти два элемента при растворении улетают в виде летучих фторидов. В табл. 1 приведены также несколько примесных элементов с содержанием выше 0,02%. Кроме элементов, приведенных в табл. 1, методы ЛА-ИСП-МС и МС/АЭС-ИСП позволили определить еще более 30 примесных элементов, содержание которых находится в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $10^{-6}$  мас.%. Погрешность определения методом МС/АЭС-ИСП составляла от 5 до 15% в зависимости от элемента и уровня его содержания, а погрешность определения методом ЛА-ИСП-МС колебалась от 15 до 30% [4]. Эти данные могут быть полезны в дальнейшей работе при сравнении различных образцов гусевского стекла.

Одна из задач настоящей работы заключалась в оценке возможностей портативного анализатора «X-Met7500» применительно к анализу образцов стекол. Из-за поглощения длинноволновой области рентгеновского спектра воздухом использование данного прибора ограничено элементами, стоящими в Периодической таблице после натрия. Содержание элементов в стекле рассчитывается по фундаментальным параметрам с помощью стандартной программы Mining, разработанной для анализа минералов и горных пород. Проводили пять параллельных измерений подвески. В табл. 1 приведены данные по наименьшему и наибольшему содержанию элементов в стекле, а также среднее значение. Как видно из данных табл. 1, разброс этих значений составляет не более 1%. Для Si, K, As, Pb и Mn средние значения, полученные методами ЛА-ИСП-МС и МС/АЭС-ИСП хорошо согласуются. Однако для Ca отмечены

Таблица 1

## Важнейшие элементы, обнаруженные в стекле гусевского подвеса по данным ИМП-МС и РСФА

Метод	С, мас.%										
	Si	Al	Na	K	Ca	Mg	As	Pb	Mn	B	Fe
ЛА-ИСП МС и МС/АСЭ-ИСП	34,66	0,062	0,285	13,48	6,37	0,03	0,37	0,314	0,026	0,005	0,041
РФС <sub>мин.</sub>	34,6	–	–	11,3	3,0	–	0,3	0,3	0,01	–	0,00
РФС <sub>макс.</sub>	35,3	–	–	12,0	3,1	–	0,3	0,3	0,02	–	0,03
РФС <sub>ср.</sub>	35,0	–	–	11,6	3,0	–	0,3	0,3	0,02	–	0,02

Таблица 2

## Содержание основных компонентов стекла (мас.%) подвеса (1) в сравнении с европейскими стеклами (2 – кубок Налибоки (ок. 1790 г., Национальный музей, Варшава, инв. 34066/3); 3 – крышка богемского кубка первой половины XVIII в. (Национальный музей, Познань, инв. Rz 1245/2))

Номер изделия	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	PbO	MnO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ссылка
1	74,27	0,12	0,38	16,24	8,92	0,11	0,48	0,34	0,03	0,02	0,06	
2	67,49	0,94	0,99	18,11	9,34	0,24	0,86	0,44	0,48	<0,4	0,13	[6]
3	73,15	0,31	0,55	14,17	9,48	<0,17	1,21	0,36	0,05	<0,4	0,04	[6]

существенные расхождения, что показывает необходимость доработки программы Mining. На наш взгляд, портативный рентгенофлуоресцентный анализатор можно использовать для оценочного измерения содержания в стекле элементов, начиная с кремния. Для повышения точности определения требуется специальная калибровка прибора.

Из данных табл. 1 следует, что подвес выполнен из поташно-известкового стекла с очень низким содержанием свинца. Такое стекло соответствует средневропейскому рецепту XVIII в. (ближайшие аналогии отмечены в богемских и польских составах). Его можно рассматривать как результат последовательного усовершенствования рецептуры в сторону уменьшения содержания свинца и увеличения количества кальция. По составу стекла ближе всего к подвесу оказались кубок (1790 г.) Налибоки и крышка богемского кубка первой половины XVIII в. [5–7] (табл. 2).

В отличие от продукции саксонских (Дрезден, Альтмюнден) и бранденбургских (Потсдам, Цехлин) заводов, обычно содержащей более 5% PbO, стекло Богемии и Восточной Польши было низкосвинцовым или вообще не содержало свинца. На сознательное введение в шихту небольших количеств свинцового сурика косвенно указывает наличие в составе свинца мышьяка, введенного в меньших количествах, чем это было принято при варке стекол с большим содержанием свинца.

Обратимся к анализу других примесных компонентов стекла. Натрий, вероятно, попал в стекло в виде примеси в поташе, алюминий вошел в стекломассу в процессе варки из глиняных горшков. Содержание магния соответствует его примеси в известняке. О высокой чистоте гжельских песков свидетельствует низкое содержание в них железа, а следовательно, и небольшого количество пиролюзита, введенного для оптического и химического обесцвечивания. Для сравнения заметим, что стекло кубка из Налибоки содержит почти вдвое больше железа и соответственно, значительно большее количества введенного пиролюзита. Небольшое количество оксида бора также неизменно присутствовало в средне-европейских рецептах, созданных во второй половине XVII в. Первоначальные составы стекол были неустойчивы – они легко мутнели и растрескивались с поверхности при длительном хранении на влажном воздухе. Это было следствием низкого содержания кальция. В конце XVII – первой половине XVIII в. количество оксида кальция в стекле стало возрастать. В стекле подвеса (1) массовое отношение K<sub>2</sub>O/CaO составляет 1,82, в стекле 2 – 1,9; в стекле 3 – 1,5 (табл. 2). Можно предположить, что используемая рецептура изготовления стекла сложилась в России еще в XVIII в. и практически без изменений дошла до второй половины XIX в. На выставке

российских мануфактурных изделий (1849 г.) в Санкт-Петербурге гусевские изделия занимали достойное место. В обозрении выставки А. Максимович указывал, что мальцовским заводам «принадлежит честь введения у нас обыкновенных стеклянных составов, взамен настоящего хрустального... употребив надлежащим образом очищенные вещества, входящие в состав стекла, можно и в России готовить вещи, не уступающие изделиям богемских стеклянных заводов» [8].

Описанный нами состав гусевского стекла соответствует сырью, поступающему на Гусевскую хрустальную фабрику Мальцова согласно ведомости за 1870 г. В ней указывается, что «фабрика употребляет материалы: поташ, селитру, марганец, сурик, лазорьку, антимоний, дрова, глину и песок. Приобретает оные в Санкт-Петербурге, Москве, Казанской, Тульской, Пензенской и здешних губерниях. Изделия продаются внутри государства преимущественно в Москве, Санкт-Петербурге, Нижегородской и Ирбитской ярмарках» [9]. О масштабах производства свидетельствует наличие на фабрике двух паровых мельниц для шлифовки посуды, одна в 24, другая в 12 лошадиных сил, приводящих в движение 90 шлифовальных и 50 гранильных колес. На фабрике работало 350 человек, из них 220 вольнонаемных, 50 приемщиков, 80 человек было занято в простых работах. На территории фабрики находились «строения каменные: одна гута, одна рисовня, одна шлифовальня, одна гончарня, одна составная, один магазин для складки готовых изделий, два магазина для складки материалов и припасов, одна кузня, одно пожарное депо, одна мельница, одна больница, один амбар для известки и одна контора для письменного производства; и деревянные: одна шлифовальня, один магазин для складки материалов и два для хранения запасов» [10]. В «Описании и оценке Гусевского хрустального завода действительного тайного советника И.С. Мальцева в Меленковском уезде», составленном «февраля 11 дня 1878 г.» приведены сведения о количестве и стоимости перерабатываемого сырья: «песку 30 тыс. пудов на 6100 руб., глины 20,6 тыс. пудов на 3200 руб., поташа 9,6 тыс. пудов на 22600 руб., соды 1 тыс. пудов на 2200 руб., подзола (выщелаченной золы, которая заменяла более дорогой поташ при варке стекла низкого качества) 4 тыс. пудов на 440 руб.». В то время фабрика вырабатывала более 1200 пудов хрустала на сумму, превышающую 250 тыс. рублей. В этой описи впервые появляется упоминание о соде, что свидетельствует о начале про-

изводства натриевого стекла. Сода в то время была дорогой и приобреталась Мальцовым за границей [11]. Фабрика полностью работала на дровяном топливе, шлифовальные станки приводились в действие английской паровой машиной. Фабрика освещалась ночниками, газового освещения не было. Стекло варили в горшках в трех русских печах, для отжига использовали четыре калильные печи. Еще две дровяные печи служили для сушки дров и две – для сушки горшков.

В приведенных описях нет разделения стекла на высокосвинцовое и практически бессвинцовое поташное стекло. Об изготовлении свинцового хрустала свидетельствует упоминание о сурике в списке употребляемых материалов. Однако отсутствие сурика в описи 1878 г, где перечислено лишь основное сырье, указывает на небольшой объем производимого свинцового хрустала, который шел на изготовление уникальных изделий, а не массовой продукции. Все бесцветное стекло, независимо от содержания в нем свинца, было принято называть хрустальным.

Исследование люминесценции исторических стекол связано с содержанием в них свинца и марганца. Польские ученые в своих исследованиях надежно доказали, что синяя флуоресценция средне-европейского барочного стекла XVIII в. вызвана содержанием в нем свинца [12, 13]. Свинец(II) принадлежит к числу ионов с заполненной *d*-оболочкой, изоэлектронной атому ртути. Спектральные уровни возбужденных состояний располагаются в порядке возрастания энергии в ряд

$${}^3P_0 < {}^3P_1 < {}^3P_2 < {}^1P_1,$$

Переходы на первый и третий уровни запрещены в поле кубической симметрии. Флуоресценция

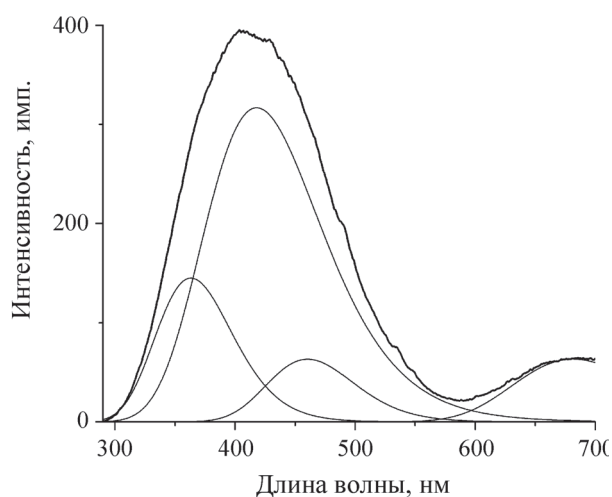


Рис. 3. Спектр флуоресценции образца

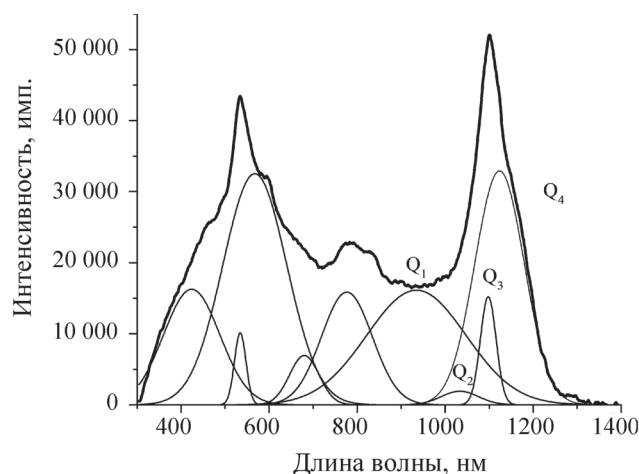


Рис. 4. Рамановский спектр образца

заметна даже при низком содержании свинца в стекле (менее 0,2%). В исследуемом образце (рис. 3) при облучении его лазером с длиной волны 252 нм наблюдается несимметричный пик, который может быть разложен на три гауссовы составляющие с максимумами 362, 417 и 460 нм. Наиболее сильный максимум отвечает длине волны 417 нм ( ${}^3P_0-{}^1S_0$ ), два других находятся при ( ${}^3P_1-{}^1S_0$ ) и ( ${}^1P_0-{}^1S_0$ ). Из литературы известно, что положения максимумов сильно зависят от концентрации свинца в стекле. Чем выше концентрация свинца, тем сильнее смещение пиков в фиолетовую часть спектра [14]. Слабая интенсивность пиков и сильное их смещение в красную область спектра может быть вызвано не только низким содержанием свинца в образце, но и концентрационным тушением, вызванным присутствием в стекле ионов марганца [15]. Слабозаметное плечо в области 525 нм обусловлено зеленой люминесценцией ( ${}^4T_1 - {}^6A_1$ ) содержащихся в стекле ионов марганца(II) [16].

В рамановском спектре образца (рис. 4) наблюдаются пики, отвечающие валентным и деформационным колебаниям связей Si–O кремнекислородного каркаса силикатного стекла. Пики в области 500–600  $\text{см}^{-1}$  соответствуют деформационным колебаниям в каркасе. Широкий асим-

метричный пик в области 900–1200  $\text{см}^{-1}$  может быть разделен на четыре гауссовы составляющие, отвечающие колебаниям  $Q_1$  (931  $\text{см}^{-1}$ ),  $Q_2$  (1030  $\text{см}^{-1}$ ),  $Q_3$  (1099  $\text{см}^{-1}$ ),  $Q_4$  (1122  $\text{см}^{-1}$ ), которые соответствуют атомам кремния с тремя, двумя, одним и нулевым числом концевых атомов кислорода [17, 18]. Степень связанности каркаса характеризуется через индекс полимеризации  $I_p$ . Последний рассчитывают как отношение площадей пиков в области 500 и 1000  $\text{см}^{-1}$ , отвечающих деформационным и валентным колебаниям. В сильно полимеризованных структурах чем сильнее амплитуда движения мостикового кислорода в плоскости перпендикулярна связи O–Si–O, тем сильнее изменение поляризации связи и тем сильнее полоса при 500  $\text{см}^{-1}$ . В менее полимеризованных структурах сильнее проявляются валентные колебания концевых кислорода, возрастает интенсивность валентных колебаний при 1000  $\text{см}^{-1}$ , поэтому  $I_p$  понижается [19]. Присутствие в стекле значительного количества катионов калия и кальция, выступающих в роли модификатора и стабилизатора, приводит к значительному ослаблению каркаса, что выражается в уменьшении интенсивности полосы деформационных колебаний Si–O–Si в области 500  $\text{см}^{-1}$  [20]. Рассчитанная величина  $I_p$  в изученном гусевском стекле составляет 1,26, что типично для щелочно-известковых стекол с температурой варки выше 1000 °С.

### Выводы

Данное исследование, несмотря на свой точечный характер, позволяет охарактеризовать состав и свойства стекла, производимого на крупнейшем частном заводе Российской империи в середине XIX в. Мы рассматриваем его как начало большой работы по изучению составов, свойств и технологии производства русского художественного стекла XVIII–XIX вв.

Авторы выражают благодарность А.А. Елисееву за съемку рамановских спектров и участие в их обсуждении, П.В. Евдокимову за измерение дилатометрических характеристик образца, А.Ю. Гришко за регистрацию спектров люминесценции.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуканова А.В. Осветительные приборы XIX–XX вв. в коллекции стекла ГВСМЗ / В сб. «Гимн стеклу». К 30-летию Музея хрусталя им. Мальцовых. Мат-лы науч.-исследовательских работ. 2013. С. 202.
2. Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.В., Бурмий Ж.П. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 7. С. 6.
3. Wagner B., Nowak A., Bulska E., Kunicki-Goldfinger J., Schalm O., Janssens K. // Microchim. Acta. 2008. Vol. 162. P. 415.
4. Хвостиков В.А., Карандашев В.К., Бурмий Ж.П. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 9. С. 14.
5. Kunicki-Goldfinger J.J., Kierzek J., Kasprzak A.J., Dzier-

- zanowsky P., Malozewska-Bucko B., Misiak A. / Archäometrie und Denkmalpflege – Kurzberichte 2003, Berlin 2003. P. 56.
6. Kunicki-Goldfinger J., Kierzek J., Dzierzanowski P., Kasprzak A.J. / Annales du 16e Congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre (London, 2003). Nottingham, P. 258.
  7. Kunicki-Goldfinger J., Kierzek J., Kasprzak A.J., Malozewska-Bučko B. // Physico-chemical studies. In Annual Report. 1998. Warsaw, P. 130.
  8. Максимович А. Обзор выставки российских мануфактурных изделий в Санкт-Петербурге в 1849 году. СПб., 1850. С. 361.
  9. Ведомость Гусевской стеклянной фабрики, состоящей Владимирской губернии в Меленковском уезде, принадлежащей действительному тайному советнику кавалеру И.С. Мальцову за 1870 г., ГВЦМЗ. Фонд 14, оп. 3, д. 327, л. 253.
  10. «Дело об имуществе гусевского хрустального завода, принадлежащего действительному тайному советнику И.С. Мальцову в Меленковском уезде», ГВЦМЗ. Фонд 379, оп. 107, д. 779.
  11. Вестник промышленности, май 1885. С. 13.
  12. Kunicki-Goldfinger J., Kierzek J., Kasprzak A., Malozewska-Bučko B. // X-Ray Spectrometry 2000. T. 29. N 4. P. 310.
  13. Kunicki-Goldfinger J., Kierzek J., Dzierzanowski P. / In 17e Congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre, 4–8 September 2006, Antwerp. Book of Abstracts. 197.
  14. Bettinali C., Ferraresco G. // Journ. of Non-Crystalline Solids. 1968. N 1. C. 91.
  15. Bettinali C., Gottardi V., Locardi B. // Journ. of Non-Crystalline Solids. 1969. N 1. 360.
  16. Sanada T., Yamamoto K., Wada N., Kojima K. // Thin Solid Films. 2006. Vol. 496. P. 169.
  17. Wang M., Cheng, J. Li M., He F. // Physica B. 2011. Vol. 406. P. 3865.
  18. Umesaki N., Takahashi M., Tatsumisago M., Minami T. // J. of Non-Crystalline Solids. 1996. Vol. 205–207. P. 225.
  19. Colomban P., Tournie A., Bellot-Gurlet L. // Journ. Raman Spectrosc. 2006. Vol. 37. P. 841.
  20. Feller S., Lodden G., Riley A. et al. // Journ. of Non-Crystalline Solids, 2010. Vol. 356. P. 304.

Поступила в редакцию 10.12.17

## COMPOSITION OF CRYSTAL GLASS MADE IN THE MIDDLE OF NINETEENTH CENTURY AT GUS-KHRUSTALNYI FACTORY

A.A. Drozdov<sup>1\*</sup>, M.N. Andreev<sup>1</sup>, A.V. Chukanova<sup>2</sup>, V.K. Karandashev<sup>3</sup>, V.A. Khvostikov<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Department of Chemistry, Inorganic Chemistry Division; <sup>2</sup> Vladimir-Suzdal History, Architecture and Art Museum and Reserve; <sup>3</sup> Institute of Microelectronics Technology and High-Purity Materials of the Russian Academy of Sciences; \*e-mail: camertus@mail.ru)

**This is the first study of crystal glass composition made on a sample produced at Gus-Khrustalnyi factory in the middle of the XIXth century. A sample studied is a potassium-calcium glass with a low lead content. The receipt of such composition has been firstly developed in the middle Europe in the second half of the XVIIth century and then improved in the beginning of XVIIIth. A possibility to use a portable XRF spectrometer for express analysis of historical glasses is demonstrated.**

**Key words:** silicate glass, history of glassmaking, XRF analysis, Raman spectroscopy, luminescence spectroscopy.

**Сведения об авторах:** Дроздов Андрей Анатольевич – доцент кафедры неорганической химии химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, канд. хим. наук (camertus@mail.ru); Андреев Максим Николаевич – инженер кафедры неорганической химии химического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (maksandreev@inbox.ru); Чуканова Алла Витальевна – хранитель музейных предметов, ответственный хранитель коллекции стекла Государственного Владимиро-Суздальского музея-заповедника, Гусь-Хрустальный филиал (gusalla68@mail.ru); Карандашев Василий Константинович – зав. лабораторией ядерно-физических и масс-спектральных методов анализа Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, канд. хим. наук (karan@iptm.ru); Хвостиков Владимир Анатольевич – ст. науч. сотр. Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, канд. физ.-матем. наук (khvos@iptm.ru).