
СОСТАВ И ПРОИСХОЖДЕНИЕ СТЕКЛА МОГИЛЬНИКА ФРОНТОВОЕ 3 В ЮГО-ЗАПАДНОМ КРЫМУ: ДАННЫЕ АНАЛИЗА МЕТОДОМ ЛА-ИСП-МС

Ольга Сергеевна Румянцева

*Институт археологии Российской академии наук, Москва, Россия
o.roumiantseva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5648-6079>*

Мария Владимировна Червяковская

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия
zaitseva.mv1991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7074-5433>*

Василий Станиславович Червяковский

*Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия
v.chervyakovsky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0400-6819>*

Аннотация. Состав стекла 147 сосудов из могильника Фронтное 3 в Юго-Западном Крыму конца I – рубежа IV/V вв. проанализирован методом ЛА-ИСП-МС. Полученные результаты дополняют и уточняют опубликованные данные об основном составе стекла из Фронтного 3, ранее изученном методом СЭМ-ЭДС. Подтверждается связь групп стекла, выделенных для ранних горизонтов могильника, с известными на территории Римской империи группами римского зелено-голубого (с примесью марганца, но без прочих маркеров вторичной переработки стекла); римского, обесцвеченного марганцем; обесцвеченного сурьмой; стекла «смешанного» состава с марганцем и сурьмой. Группы переходного и позднего горизонтов могут быть идентифицированы как стекло, близкое по составу Джаламе / левантийской I группе; сериям Foy-3.2; Foy-3.2/2.1; группам НИМТ и НИМТ/Foy-3.2/2.1. Состав образца на растительной золе из погребения второй половины III – середины IV в. хорошо соотносится с группой Magby VI–VII вв. и является, вероятно, одним из наиболее ранних примеров его использования. Среди стекла предположительно «смешанного» состава (группа 9a) выявлена серия образцов, близких группам сиро-палестинского происхождения. Они концентрируются в поздней части могильника (IV – рубеж IV/V вв.) и являются, предположительно, продуктом вторичной переработки левантийского стекла, смешанного с египетским. Для групп, предположительно использовавшихся в местном производстве (в Херсонесе?), выявлены выраженные признаки интенсивного использования стеклосбоя, что в целом типично для периферийных производственных центров позднеантичного мира, испытывавших, вероятно, недостаток в «свежем» сырье.

Ключевые слова: стекло, химический состав, Юго-Западный Крым, римское время, ЛА-ИСП-МС, сиро-палестинское стекло, египетское стекло, вторичная переработка

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 20-18-00396-П «Варвары и Рим в Юго-Западном Крыму: взаимодействие культур». Выражаем благодарность А. Н. Свиридову и С. В. Языкову за возможность обработать и опубликовать материалы их раскопок.

THE COMPOSITION AND ORIGIN OF GLASS FROM THE CEMETERY OF FRONTOVOE 3 IN THE SOUTH-WESTERN CRIMEA: LA-ICP-MS DATA

Olga S. Rumyantseva

*Institute of Archaeology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
o.roumiantseva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5648-6079>*

Maria V. Chervyakovskaya

*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
zaitseva.mv1991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7074-5433>*

Vasiliy S. Chervyakovskiy

*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia
v.chervyakovsky@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0400-6819>*

Abstract. Chemical composition of 147 samples of glass from the burial ground of Frontovoe 3 has been studied with LA-ICP-MS technique, in addition to previously published SEM-EDS results [2]. The burial ground of the late 1st – late 4th / early 5th century AD has been excavated in South-Western Crimea, in the outskirts of Sevastopol. New results yield additional information about trace element composition of glass and update the published data. They confirm the identification of the groups from the early part of the cemetery with Roman blue-green glass (with unintentional addition of manganese but without any other markers of recycling); Roman glass decolourized with manganese; glass decolourized with antimony; “mixed” Mn-Sb glass. The groups of the transitional and late parts of the burial ground can be identified as series glass, close to Jalame/Levantine I group; series Foy-3.2; Foy-3.2/2.1; groups HIMT, and HIMT/Foy-3.2/2.1 glass. The composition of a sample of plant ash glass from a burial of the 2nd half of the 3rd – mid-4th century is close to the Magby group, actually dated to the 6th-7th century. It is likely one of the earliest examples of glass of such composition. Among the glass of eventually “mixed” composition (group 9a) a series of samples, compositionally close to the glass of syro-palestinian origin. They are concentrated in the late part of the burial ground (4th – late 4th/early 5th centuries) and likely represent products of recycling Levantine glass with added Egyptian cullet. For the glass groups which were eventually used in the local production (in Chersonese) there is evidence of extensive recycling. Generally, it is typical for the workshops situated on the periphery of the late Roman world, which likely experienced a shortage of “fresh” raw glass.

Keywords: glass, chemical composition, south-western Crimea, Roman period, LA-ICP-MS, Levantine glass, Egyptian glass, recycling

Acknowledgements: This study was funded by the Russian Science Foundation, project no. 20-18-00396-П “Barbarians in the South-Western Crimea: The Interaction of Cultures.”

Стекло могильника Фронтное 3, открытого в окрестностях Севастополя, представляет собой особый источник по культурным связям варварского населения Юго-Западного Крыма и ремесленным традициям мастеров, на протяжении более трех столетий производивших стеклянную посуду, обнаруженную в раскопанных здесь захоронениях. Этот памятник конца I – рубежа IV/V вв. был полностью изучен в 2018 г. экспедицией Института археологии РАН под руководством А. Н. Свиридова и С. В. Язикова [1]. Химический состав стекла был определен для 147 из более чем 230 сосудов, происходящих из погребений некрополя. Исследования основного состава стекла методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (СЭМ-ЭДС) показали, что оно происходит из стекловаренных центров Сиро-Палестинского региона и Египта и представляет собой материал групп, широко распространенных в Средиземноморье и европейских провинциях Римской империи [2]. В настоящее время результаты СЭМ-ЭДС были дополнены данными масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой, с пробоотбором лазерной абляцией (ЛА-ИСП-МС), которые мы публикуем в данной статье¹. Этот анализ позволяет оценить содержание следовых элементов, существенно расширяя возможность охарактеризовать источники сырья, использовавшиеся древними стеклоделами, и, следовательно, получить более полную информацию о происхождении стекла. Данный метод также уточняет результаты СЭМ-ЭДС для элементов, содержание которых в малых концентрациях определяется данным методом с погрешностями, прежде всего, титана и сурьмы, наиболее значимых для стекла римского времени [3]. Кроме того, ряд элементов в микро- и следовых содержаниях, определяемых ЛА-ИСП-МС, позволяет охарактеризовать такие практики стеклоделов, как степень и характер вторичной переработки стекла. Маркерами этой практики являются присутствие в не окрашенном намеренно стекле римского времени одновременно двух обесцвечивателей (марганца и сурьмы), а также элементов, связанных с красителями (меди, кобальта, олова, свинца и некоторых других) и попадавших в стекло с недостаточно тщательно отсортированным стеклом [4; 5; там же см. ссылки на литературу]. Последнему сюжету посвящена отдельная публикация [6], здесь мы лишь кратко

¹ В данной публикации рассматривается состав естественно окрашенного и обесцвеченного стекла; состав окрашенного стекла будет рассмотрен отдельно.

остановимся на итогах анализа. Основной задачей данной статьи является детальная характеристика выделенных ранее групп стекла, позволяющая уточнить и дополнить итоги проведенной ранее работы [2]. В современной литературе комплексный анализ основного состава и содержания в нем следовых элементов является «золотым стандартом» изучения стекла как археологического источника.

Методика анализа. 147 образцов прозрачного стекла, бесцветного или имеющего естественный оттенок, был изучен методом ЛА-ИСП-МС в Центре коллективного пользования «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург).

Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой с пробоотбором лазерной абляцией (LA-ICP-MS) выполнялась на приборе ICP-MS NexION 300S (PerkinElmer), оснащенный приставкой LA NWR213 (ESI). Для анализа использованы образцы, подготовленные для исследования методом (СЭМ-ЭДС) [2]. Операционные параметры приставки для ЛА: энергия лазерного излучения – 11–11.5 Дж/см², частота повторений импульсов – 10 Гц, диаметр кратера – 50 мкм, расход транспортирующего потока He – 400 мл/мин, время работы лазера – 50 с, время прогрева лазера перед измерением – 20 с. Операционные параметры ИСП-МС: расход пробоподающего потока Ar – 1.05–1.1 л/мин, мощность радиочастотного генератора – 1500 Вт, время задержки на массе – 10 мс, число циклов сканирования – 1, число реплик – 500. Длина соединительной трубки МС и ЛА – 1.5 м. Обработку результатов проводили в программе GLITTER V4.4. с использованием внутреннего стандарта SiO₂, в качестве внешнего стандарта использовали стандартное стекло NIST SRM 610, в качестве вторичного стандарта – стекло NIST SRM 612, измеренные методом «взятия в вилку» через 10–12 измерений (табл. 1). При измерении эталонов не удалось добиться удовлетворительной воспроизводимости результатов по фосфору, в связи с чем мы публикуем данные по данному элементу справочно (на качественном уровне), понимая, что они могут иметь довольно существенную погрешность.

Результаты исследования. В результате анализа методом СЭМ-ЭДС среди стекла могильника Фронтное 3 было выделено 3 группы сиро-палестинского происхождения (группы 1, 2, 5) и 4 группы – египетского (группы 3, 6, 7, 8). Одна группа была определена как стекло «смешанного» состава (группа 4), стекло еще одной, группы 9, было предположительно интерпретировано как результат вторичной переработки разнородного стекла, состав которого не удалось привязать ни к одной из выделенных групп [2]. Новые данные анализа (табл. 2; см. также не опубликованные ранее данные основного состава трех образцов, полученные методом СЭМ-ЭДС – табл. 3) будут рассматриваться по выделенным группам, объединенным по происхождению.

Группы стекла сиро-палестинского происхождения

Из трех групп стекла сиро-палестинского происхождения две относятся к ранней части могильника. Сосуды из стекла группы 1, т.н. римского зелено-голубого, сконцентрированы в его северо-западной зоне. Из него сделаны самые ранние сосуды, попавшие в захоронения Фронтного 3. На основании прочих категорий погребального инвентаря данная группа была датирована концом I – II в. (преимущественно первой половиной столетия) [2, с. 75–76]. К группе 2 отнесено аналогичное по составу стекло, по принятой в литературе терминологии – «римское, обесцвеченное марганцем» [7; 8]. Стекло одного из сосудов группы 2 (табл. 2, Фр-128) окрашено марганцем в фиолетовый прозрачный цвет. Данная группа была датирована на основании сопровождающего инвентаря II – серединой III в. [2, с. 77–78]. Третья группа стекла левантийского происхождения – группа 5 – занимает участок могильника, переходный от ранней к поздней части. Погребения с сосудами из такого стекла были датированы серединой III в. (или чуть ранее) – серединой IV в. [2, с. 82–83]. И, если датировка групп 1 и 2 в целом хорошо согласуется со временем распространения аналогичного по составу стекла на территории Римской империи, то время распространения стекла группы, с которой была соотнесена группа 5, на территории средиземноморского региона и европейских провинций Римской империи определяется не ранее IV в. [ссылки на литературу см.: 2].

Сопоставление в стекле трех перечисленных групп содержаний и соотношений основных элементов, характеризующих песок, использованный при его варке в качестве сырья, – кремния, кальция, алюминия и титана, а также соотношение, в котором песок смешивался с природной содой, подтверждают полученные ранее выводы о его сиро-палестинском происхождении (рис. 1–2). Группы 1 и 2 идеально соответствуют по этим признакам «римскому» стеклу I–III вв. н.э. На диаграмме (рис. 1) оно сопоставлено с выборкой образцов, происходящих с судна Юлия Феликс, затонувшего в водах Адриатического моря недалеко от итальянского города Градо в первой половине III в. [7]. Состав стекла группы 5, в сравнении с более ранними группами 1 и 2, отражает общие изменения, со временем происходившие в продукции сиро-палестинских стекловаренных центров – повышение концентраций алюминия и снижение – натрия [9, р. 343–344]. На диаграммах по соотношению натрия, кремния, алюминия и кальция он наиболее близок стеклу из Джаламе (современный Израиль, IV в.), а по соотношению алюминия и титана – к продукции стекловаренного центра в Аполлонии VI–VII вв. С материалами Джаламе его также сближает наличие обесцвечивателя – марганца; после V в. левантийское стекло больше не обесцвечивается [9; 10]. Очевидно, стекло группы 5 из могильника Фронтное 3 отражает состав продукции сиро-палестинской мастерской, географически близкой стекловаренным центрам, продукция которых известна нам по материалам IV–VII вв., и, следовательно, работавшей на сырье с сходными, лишь очень незначительно отличающимися геохимическими характеристиками. По времени она появляется несколько ранее, чем стекло состава, известное нам по материалам Джаламе – во второй половине III в.

Стекло групп 1, 2 и 5 близко продукции сиро-палестинских стекловаренных центров не только по основному составу, но и по концентрациям следовых элементов, характеризующих песок – основное сырье стеклоделов. Графически это отражает диаграмма (рис. 3), где модель их распределения в стекле этих трех групп сопоставлена с аналогичными моделями, построенными для продукции сиро-палестинских стекловаренных центров, археологически изученных на территории современного Израиля [9; 11; 12] – Аполлонии (Арзуфе) и Бет Элиезере. Хронологически они более поздние – время существования первого определяется VI–VII вв., второго – VIII в. [9; 12; там же см. ссылки на литературу], однако их продукция хорошо отражает геохимические характеристики песков данного региона. Стекловаренных мастерских римского времени, изученных археологически, здесь на сегодня неизвестно. Для построения диаграммы содержания элементов в стекле были нормированы к их среднему содержанию в земной коре [по: 13], что позволяет, выявив аномальные содержания некоторых из них в изучаемом материале, более наглядно представить полученные результаты [11, р. 73; 14, р. 80].

И в стекле групп 1, 2 и 5 из Фронтного, и в сырье левантийских центров фиксируются пики аномально высоких содержаний стронция (обусловленные присутствием в береговом песке, использованном в качестве сырья, морских раковин) и бария [11, р. 73]. Кроме того, в стекле части образцов группы 5 наблюдается корреляция между содержаниями марганца и стронция (рис. 4,2), которая указывает на то, что часть стронция попала с состав стекла не только с песком, но также и с обесцвечивателем [15, р. 629]; этим объясняется более высокая средняя концентрация Sr в стекле группы 5. Некоторые различия могут объясняться также изменением со временем локаций мастерских.

Более высокие содержания бария в стекле из Фронтного 3, по сравнению с Аполлонией и Бет Элиезером, объясняются также тем, что барий содержится не только в песке, но и в обесцвечивателе – марганце [14, р. 71–74; см. также 16], который есть в стекле Фронтного, но отсутствует в сырье из Израиля. Это подтверждает прямая зависимость между концентрациями марганца и бария, существующая в изучаемом нами стекле (рис. 4,1).

Стекло всех трех левантийских групп практически не несет выраженных признаков вторичной переработки. В группе 1 к ним можно отнести только марганец, концентрация которого лишь в одном образце (143 ppm, табл. 3, Фр-134) соответствует уровню его естественного содержания в сырье стеклоделов. В остальных образцах его концентрация

и соотношение с железом (нежелательное красящее действие которого как раз нейтрализовывал обесцвечиватель) выше, чем естественная примесь к сырью, но ниже, чем это необходимо для обесцвечивания стекла [17, р. 351; 6; там же см. ссылки на литературу]. Вероятно, марганец в образцах данной группы маркирует присутствие исключительно неокрашенного стеклобоя, не содержащего цветных декоративных элементов. Он мог быть тщательно отсортирован, и, возможно, был добавлен уже на этапе варки стекла. В группах 2 и 5 маркеры вторичной переработки стекла присутствуют лишь в единичных образцах (табл. 3, Фр-66, 137, 24, 39). Отметим, что и в других регионах левантийское стекло имеет достаточно «чистый» состав, по сравнению с египетским [18, р. 10, 12; 16].

Стекло египетского происхождения

В группу 3 были объединены образцы стекла, обесцвеченного сурьмой, египетское происхождение которого, ранее предполагаемое на основе состава и зон наибольшего распространения, недавно было подтверждено на основе анализа изотопов гафния [19; 20; 21]. Распространение стекла данной группы датировано по материалам Фронтового 3 II–III вв.; изготовленные из него сосуды сосредоточены в ранней части могильника [2]. Это стекло, самое высококачественное среди материала римского времени, отличается самыми низкими содержаниями элементов-примесей песка (преимущественно нежелательных), как на уровне основного состава [2], так и микро- и следовых элементов – титана, ванадия, галлия, рубидия, циркония и др. (табл. 2).

Содержание и соотношения основных характеристик песка (рис. 5) – кремния, алюминия и титана – соответствуют группе Foу-4 (или CL1), выделенным на средиземноморских и западноевропейских материалах [2; 17; там же см. ссылки на литературу]. Лишь один образец (табл. 2–3, Фр-22) отличается от стекла этой группы – концентрация титана в нем более высокая; его характеризует также более низкое содержание кальция. На диаграмме он расположен выше той зоны, где сосредоточены остальные образцы группы 3. Он также отличается по содержанию сурьмы, свинца и олова (см. ниже).

Содержание следовых элементов (рис. 6) в целом подтверждает принадлежность обесцвеченного сурьмой стекла из Фронтового 3 к группе, широко распространенной в римское время в Средиземноморье и Западной Европе. Их распределение очень близко тому, что было получено для стекла с судна Юлия Феликс (см. выше), а также с корабля, затонувшего в водах Франции, недалеко от островов архипелага Амбье [22; 23]. Для стекла с Юлия Феликс характерно лишь несколько более высокое содержание церия; однако в изученном нами ранее материале с других восточноевропейских памятников оно также не фиксировалось [16; 24]. Незначительное содержание мышьяка попадало в стекло вместе с обесцвечивателем – сурьмой.

Анализ маркеров вторичной переработки показывает, что стекло данной группы – самое «чистое» от примесей стеклобоя [6]. Лишь в четырех образцах из 21 (табл. 2, Фр-50, 87, 99, 107) зафиксированы слегка завышенные содержания марганца, свидетельствующие о его присутствии; содержания прочих маркеров вторичной переработки, связанных с красителями, крайне низки. Это позволяет заключить, что, если небольшая доля стеклобоя и добавлялась в массу при производстве готовых изделий из стекла данной группы, то он очень тщательно сортировался. Это идеально бесцветное стекло, самое высококачественное среди известного в римское время, обычно берегли от смешения со стеклобоя и на территории римских провинций [8; 25 и др.].

Образец группы 3 с повышенной концентрацией титана и пониженной – кальция (табл. 2, Фр-22, см. также выше) характеризуют также повышенное содержание свинца и олова (7970 ppm, или 0,92 % PbO, и 201 ppm, или 0,03% SnO₂), и более высокое, чем в прочих образцах, содержание сурьмы (13565 ppm, или 1,8% Sb₂O₃). Свинец и олово в данном случае могли являться геохимическими спутниками сурьмы или намеренно вводиться в обесцвеченное сурьмой стекло; подобный состав считается характерным для раннего стекла этой группы, датирующегося I–II вв. [26]. Такое сочетание – высокое содержание

сурьмы и свинца – отличает также находки эллинистического времени [27, р. 173]. Помимо перечисленных признаков, от стекла группы 3 данный образец отличается также более высокими концентрациями титана (921 ppm, или 0,15% TiO_2) и циркония (98 ppm), не характерными для данной группы, но в целом типичными для стекла египетского происхождения [см., напр.; 15; 28; 29]. Во Фронтонном из этого стекла изготовлен выдувной балзамарий, найденный в погребении 73. Данное захоронение расположено на участке с могилами второй половины/конца II – первой половины III в. [30, с. 219; 31]. Исходя из имеющихся данных, объяснить его состав довольно сложно; можно при этом предположить, что данный сосуд попал к населению, оставившему могильник Фронтонное, из иного источника, нежели прочие находки данной «химической» группы.

Все прочие группы предположительно египетского стекла, встреченного во Фронтонном 3, относятся к позднему горизонту могильника – IV (возможно, исключая начало столетия) – рубежа IV/V вв. [2].

Группы 6 и 7. Разделение стекла групп 6 и 7 и соотнесение их с «химическими» группами, известными по публикациям, вызвало наибольшие сложности при работе с его основным составом. Группа 6 была соотнесена с серией Foy-3.2, выделяемой на западноевропейских и средиземноморских материалах, а группа 7 охарактеризована как занимающая промежуточное положение между сериями Foy-3.2 и Foy-2.1 [2, с. 83–85]. Последняя на территории Западной Европы распространяется, начиная со второй половины V/VI в., то есть ощутимо позже, чем она датируется по материалам Фронтонного 3 [15; 22, р. 40–43 и многие другие]. Ранее стекло такой «промежуточной» группы Foy-3.2/2.1 уже выделялось на восточноевропейских материалах для черняховской культуры; наиболее детально его состав был охарактеризован для стекла-сырца с поселения Комаров на Среднем Днестре, где в IV – начале V в. существовала стеклоделательная мастерская [16; 32].

В стекле групп 6 и 7 прослеживается умеренная корреляция между содержаниями кальция, алюминия, магния, железа и титана (рис. 7). Стекло группы 6² действительно хорошо соответствует материалам серии Foy-3.2 по всем признакам – и основному составу, и содержанию следовых элементов. Стекло группы 7 по элементам основного состава, характеризующим песок стеклоделов (кальцию, алюминию, магнию, железу и титану), в большей степени соответствует «слабой» части серии Foy-2.1 – образцам с наиболее низкими в ее рамках концентрациями перечисленных элементов (рис. 5; 7). Наиболее существенные различия между выделенной нами группой 7 и более поздним стеклом Foy-2.1 прослеживаются по содержанию фосфора (среднее содержание в группе 7 и серии Foy-2.1 – 0,06 (по данным ЛА-ИСП-МС, или менее 0,1%, по данным СЭМ-ЭДС [2, табл. 2]) и 0,15/0,16 [15, tabl. 1; 29, tabl. 1] и стронция (среднее содержание в группе 7 – 465 ppm (табл. 2), в серии Foy-2.1 – 652/669 ppm [29, tabl. 1; 15, р. 629; 33, annexe 2])). Высокая концентрация стронция в серии Foy-2.1, по сравнению с 3.2, является ее диагностическим признаком и объясняется присутствием данного элемента не только в морском песке, который использовался в качестве сырья (точнее, в присутствующих в нем в обломках раковин моллюсков), но и в источнике марганца, которым обесцвечивалось стекло [15, р. 630]. В стекле из Фронтонного 3 концентрации стронция в группах 6 и 7 идентичны, а корреляции между содержаниями стронция и марганца, характерной для серии Foy-2.1 [15, р. 630], не наблюдается.

Интересно сопоставить полученные результаты с данными по стеклу-сырцу из Комарова, где ранее были выявлены группы 2/Mn и 3/Mn, по основному составу идентичные группам 6 и 7 Фронтонного. В Комарове группа 2/Mn также оказалась идентична серии Foy-3.2, а между стеклом комаровской группы 3/Mn и сериями Foy-3.2 и 2.1 прослеживаются различия на уровне содержания следовых элементов – ванадия, лантана, церия и циркония [16, fig. 5]. Эти элементы происходят из песка стеклоделов, т.е. характеризуют

² На данном этапе работы сделана корректировка: пять образцов, ранее отнесенные к группе 7, перенесены в группу 6, которой они в большей степени соответствуют по комплексу признаков основного состава и следовых элементов (Фр-26, 36, 19, 78, 136). В публикации, посвященной вторичным практикам стеклоделов, изготовивших сосуды Фронтонного [6], они рассматриваются еще в рамках групп, выделенных ранее [2].

локацию, из которой бралось сырье [15]; различия в их содержании говорят, таким образом, о различных источниках песка. Во Фронтовом группы 6 и 7 очень близки между собой по содержанию данных элементов и отличаются от группы 3/Мп из Комарова, где они несколько выше (рис. 8). Таким образом, можно предположить, что стекло группы 3/Мп является продукцией географически близкого, но все-таки иного производственного центра, эксплуатировавшего другую локацию песка. Не исключено также, что данные различия обусловлены присутствием в стекле Фронтового большого количества стеклобоя иного состава.

Группы 6 и 7 несколько различаются и по уровню содержания маркеров вторичной переработки стекла. Сурьма, попадавшая в стекло вместе с бесцветным стеклобоем более раннего времени, встречается в сопоставимых концентрациях в обеих группах. Если же судить по уровню маркеров, связанных с красителями, в первую очередь – меди и свинцу, попадавшим с цветным стеклом (например, декоративными элементами), среди стекла группы 6 преобладают образцы довольно чистого от примесей материала. В группе 7 их концентрации в среднем выше (рис. 9); они самые высокие в выборке в целом [6]. Это позволяет предположить, что в случае с группой 6 сортировка стеклобоя, предназначенного для переработки, выполнялась более тщательно – обесцвеченный сурьмой стеклобой здесь присутствует, а цветное стекло попадало, очевидно, в меньшей степени. Не исключено, что разница в составе стекла групп 6 и 7 в некоторой степени обусловлена тем, что последнее является результатом более интенсивной переработки, однако всех различий применение этой практики не объясняет [дискуссию об этом см.: 34].

Если сравнивать стекло группы 6 Фронтового 3 и серии Foу-3.2 с ряда центрально- и западноевропейских памятников, то во Фронтовом признаки вторичной переработки выражены сильнее; в римских провинциях это высококачественное стекло берегли в большей степени [34]. Высокая степень вторичного использования зафиксирована для близкого по составу стекла из римской Британии. Видимо, сходство практик, фиксирующееся на материалах Британии и Юго-Западного Крыма, обусловлено тем, что периферийные регионы испытывали недостаток в свежем сырье и в большей степени практиковали переработку стекла [6, там же см. ссылки на литературу].

В двух образцах группы 6 (табл. 2, Фр-13, 36) маркеры вторичной переработки, связанные с красителями (медь, свинец и олово), присутствуют в особенно высоких концентрациях (погребения 50 и 51; медь – 1072 и 1681 ppm (0,11 и 0,17%), свинец – 1252 и 6908 ppm (0,12 и 0,69 %), олово – 86 и 413 ppm). Из этого стекла изготовлены стакан типа I по И. Н. Храпунову и конический кубок с синими налечами [6, рис. 5]. Подобные концентрации данных элементов, в первую очередь – меди и свинца, чаще всего встречаются в средневековом стекле – на этапе, когда европейские мастерские начинают испытывать недостаток в поступлении «свежего» сырья из восточносредиземноморских стекловаренных центров, и основным сырьем становится стекольный бой более раннего времени. Считается, что данные элементы либо накапливаются в ходе многократных «переплавок», либо попадают в стекло при намеренном добавлении для объема определенной доли окрашенного материала [4; 35]. Однако иногда подобное стекло встречается и в более ранние периоды, в т.ч. в позднеримский [16; 36]. Во Фронтовом одно из захоронений с сосудами из подобного стекла относится к гуннскому времени [37, с. 240], дата второго, также из погребения с позднего участка могильника, нуждается в уточнении. Не исключено, что мастерские, из которых происходят данные сосуды, испытывали сложности с поставками сырья для производства, однако, учитывая единственный характер таких находок, обсуждать эту особенность преждевременно.

Группы 6 и особенно 7 абсолютно лидируют во Фронтовом 3 по содержанию маркеров вторичной переработки стекла; именно относящееся к ним стекло, вероятно, использовалось в мастерских Юго-Западного Крыма (Херсонеса?) для производства готовой посуды [2; 38]. Практика интенсивного применения в производстве стеклобоя в

целом типична для периферийных стеклоделательных мастерских, испытывавших, вероятно, нехватку «свежего» стекла-сырца; особенно хорошо это показано на материалах римской Британии [8; 39; 18; 29, р. 39; подробнее см. также: 6].

Один из сосудов, выполненных из стекла группы 6, по данным основного состава, полученным методом СЭМ-ЭДС, происходит из захоронения 62 конца II – первой половины III в. (Фр-17), что существенно ранее времени распространения как стекла данной группы во Фронтвом в целом, так и серии Foy-3.2 на территории римских провинций – не ранее IV в. [2; 34]. Анализ методом ЛА-ИСП-МС показал, что в образце присутствует значительная концентрация сурьмы (711 ppm, в то время как ее естественная концентрация в образцах обычно составляет менее 3 ppm и лишь в редких случаях может достигать 20 ppm [14, р. 79, 84–85]); среди стекла группы 6 в этом образце зафиксированы самые низкие концентрации титана (540 ppm, или 0,9 TiO₂) и ванадия (16 ppm); концентрация циркония также относительно не высока – 57 ppm. Учитывая данные о хронологии данной находки, можно предположить, что стекло сосуда из погребения 62 относится не к группе 6, а является результатом смешения римского бесцветного стекла со стеклом, обесцвеченным сурьмой, в ходе вторичной переработки. Это могло бы объяснить заниженные в нем концентрации алюминия, кальция и других элементов.

Еще одна группа, происхождение которой связывается с Египтом, – группа 8; ее стекло ранее было соотнесено по составу с группой НИМТ. Ее образцы характеризует более низкое содержание кальция, по сравнению со стеклом других групп египетского происхождения, распространенных в IV–VII вв. (рис. 7), при более высоких средних концентрациях железа, алюминия, магния, марганца и некоторых других элементов. Группу НИМТ отличают также самые высокие содержания титана и циркония, находящиеся в сильной положительной корреляции (что зафиксировано и для образцов группы 8 Фронтвого – рис. 10), а также хрома, ванадия, галлия, гафния и некоторых других элементов [15; 28].

По содержанию и соотношению элементов основного состава, характеризующих песок, а также по набору следовых элементов, позволяющих наиболее уверенно различать стекло НИМТ и других групп египетского происхождения (иттрия, церия, циркония) [см.: 15], только три из шести образцов группы 8 Фронтвого в полной мере соответствуют стеклу НИМТ; еще три занимают промежуточное положение между НИМТ и стеклом группы 7 / Foy-3.2/2.1, имея пограничное содержание титана и др. элементов (рис. 5; 10). Наиболее вероятное объяснение этому – смешение стекла НИМТ со стеклом иного состава в ходе вторичной переработки.

Действительно, три из шести образцов группы 8 во Фронтвом отличают выраженные признаки вторичной переработки, что в целом типично для стекла НИМТ, в том числе и для сырца, и говорит, вероятно, об интенсивном применении данной практики уже на этапе варки [33, аппехе 1]. Стоило ожидать, что значительную примесь стеклобоя должны были бы содержать образцы «пограничного состава». Однако наиболее выраженные признаки встречены как раз в образцах более типичного стекла НИМТ (Фр-145 – 124 ppm меди, Фр-138 – 832 ppm сурьмы; добавление обесцвеченного сурьмой стекла в данном случае и повлияло, вероятно, на относительно невысокое в итоге содержание в образце титана и прочих диагностических элементов). В образцах «пограничного» состава концентрации маркеров вторичной переработки стекла умеренны (в двух образцах очень незначительно завышены, на фоне всей выборки, содержания меди и в одном – сурьмы (табл. 3, Фр-63, 79)). Однако признаки вторичной переработки могут быть не выражены явно [10]; данная группа слишком мала, чтобы можно было на ее основе делать какие-либо заключения.

Итоги детального изучения группы 8 подтверждают предположение о том, что стекло НИМТ было крайне ограничено распространено в Юго-Западном Крыму, а учитывая данные по стеклу черняховской культуры, возможно, и в Восточной Европе в целом. На территории же европейских провинций Римской империи в IV–V вв. эта группа была одной из самых распространенных [28; 29, там же см. ссылки на литературу].

Стекло прочих групп (4 и 9)

Группа 4 – стекло «смешанного» состава с двумя обесцвечивателями, марганцем и сурьмой, не является «первичной» продукцией определенного стекловаренного центра. На диаграмме (рис. 11), отражающей соотношения и содержания марганца, сурьмы и алюминия [см.: 5], ее образцы расположены на линии смешения, с одной стороны, левантийского стекла групп 1 и 2, содержащих марганец или не содержащих обесцвечивателя, а с другой – египетского группы 3, обесцвеченного сурьмой. Таким образом, подтверждается предположение о том, что группа 4 является результатом совместной переработки стекла перечисленных групп, распространенных в римское время [см. также: 6]. Здесь ожидаемо присутствует самое высокое для ранней части могильника содержание прочих маркеров вторичной переработки – кобальта, меди, олова и свинца. Весьма вероятно, что именно стекло данной группы использовалось для производства готовых изделий стеклоделательным мастерским Юго-Западного Крыма [6; 38].

К *группе 9* ранее были отнесены образцы стекла из захоронений позднего и переходного участков могильника, которые по основному составу не удалось однозначно соотнести ни с одной из «первичных» групп [2]. Предполагалось, что оно представляет собой продукт интенсивной вторичной переработки материала разного состава и происхождения. Однако, судя по данным ЛА-ИСП-МС, более 2/3 образцов (9 из 13) не несет выраженных признаков присутствия стеклобоя.

Судя по содержанию следовых элементов, являющихся геохимическими характеристиками песка, восемь образцов группы 9 имеют левантийское происхождение. Основным признаком, позволяющим уточнить происхождение песка, является цирконий. В исследованной выборке его содержание до 50 ppm встречается только в сиро-палестинском стекле. Такая концентрация отличает 7 образцов группы 9 предположительно «левантийского» состава (табл. 2, Фр-5, 27, 43, 47, 48, 55, 56); их же характеризует низкое содержание титана (до 455 ppm, или до 0,75% TiO_2). Еще один образец (Фр-68) с пограничным содержанием циркония 54 ppm (и 520 ppm Ti, или 0,87% TiO_2) отличает высокое содержание марганца (1,94% MnO), не типичное стекла египетских групп 6 и 7, но встречающееся в единичных случаях среди стекла левантийской группы 5. Перечисленные образцы близки группам стекла сиро-палестинского происхождения и по большинству признаков основного состава. Они концентрируются в поздней части могильника и из сиро-палестинских групп хронологически наиболее близки группе 5, однако по содержанию алюминия большинство из них ближе более раннему, «римскому» бесцветному стеклу (рис. 2). Кроме того, большинство из них отличает высокое содержание натрия, не характерное для сиро-палестинского и более типичное для египетского стекла [9]: на диаграмме (рис. 1) они находятся за пределами зоны расположения сиро-палестинского стекла различных групп. Вероятнее всего, стекло этих сосудов является продуктом вторичной переработки, где основой стекломассы было, очевидно, стекло левантийского происхождения. При этом признаки интенсивного использования стеклобоя, как и в большинстве образцов сиро-палестинских групп 1, 2 и 5, здесь в большинстве случаев не выражены. Они отличают лишь два образца (Фр-47 и 48, 999 и 839 ppm сурьмы; за счет этого в них может быть повышена концентрация Na_2O , а в образце – снижено содержание Al_2O_3 , не типичное для группы – 2,12%). Еще в двух повышены, на фоне стекла всей выборки, содержания меди (Фр-56 и 68 – 54 и 60 ppm).

Принимая во внимание новые данные, можно скорректировать верхнюю хронологическую границу распространения во Фронтном 3 стекла сиро-палестинского происхождения. С учетом погребений 68, 41, 91 и 106, можно говорить о том, что единичные сосуды из левантийского стекла встречаются здесь на протяжении всего IV в.; погребение 86 является самым поздним на могильнике и относится уже к гуннскому времени [см.: 2, рис. 1; 37]. При этом для позднего участка «чистое» сиро-палестинское стекло уже не характерно – оно встречается здесь в переработанном виде. В ряде случаев (погребения 38, 133, 13) упомянутые находки происходят с того же участка, что и ранее выделенные

образцы группы 5 – то есть, наиболее ранние захоронения со стеклом подобного состава могут относиться уже к середине/второй половине III в. (погр. 13, 38 [2, с. 88–83]).

Формы сосудов, изготовленные из «сиро-палестинского» стекла, отнесенного к группе 9, позволяют с высокой степенью вероятности предполагать их местное (херсонесское?) производство. Из восьми находок пять (рис. 12, 1, 2, 4, 5, 7) принадлежат стаканам типа П.2 по И. Н. Храпунову – форме, типичной для Юго-Западного Крыма, очевидно, регионального производства [41; ссылки на литературу см. также: 38], один – колбообразному сосуду (рис. 12, 8), который также с высокой степенью вероятности может быть местной продукцией [38], два – сосудами со сбитым со стеклодувной трубки и необработанным краем, также широко распространенным в изучаемом регионе (рис. 12, 3, 6). Это, с одной стороны, подтверждает вывод о широком применении в локальном производстве практики интенсивной вторичной переработки стекла, с другой – для периода IV – рубежа IV/V вв. корректирует сделанный ранее вывод о том, что левантийское стекло подвергалось этой практике в меньшей степени, чем египетское [6].

По комплексу признаков основного состава, а также содержанию микро- и следовых элементов, прежде всего, титана и циркония, два образца группы 9 наиболее близки группе 6 (Фоу-3.2 – Фр-35, 133 – оба они также представлены колбообразными сосудами, возможно, местного производства) и один – группе 7 (Фр-80³).

Образцы, ранее не привязанные к группам.

Среди образцов, которые по основному составу не удалось соотнести ни с одной из групп, внимания заслуживают, прежде всего, находки из погребений 325 и 232 (табл. 3, Фр-124 и 130). Они были охарактеризованы как близкие группам 3 (Фоу-4) и 6 (Фоу-3.2), сходным по геохимическим характеристикам песка, но различающимся по типу обесцвечивателя [2, с. 87]. Сложность соотнесения их с одной из групп была вызвана, в первую очередь, как раз отсутствием в их составе сурьмы и марганца в достаточной концентрации. Низкие содержания следовых элементов – ванадия, титана, стронция, бария, циркония позволяют однозначно соотнести их с ранней группой 3, выделив в отдельную подгруппу – без обесцвечивателя. Оба образца содержат незначительную примесь марганца (340 и 2172 ppm, или 0,04 и 0,33% MnO); прочие признаки вторичной переработки в них отсутствуют.

Если говорить о хронологии, то погребение 325 на плане расположено на северо-западной оконечности могильника, где сосредоточены наиболее ранние захоронения; по краснолаковой керамике, однако, оно относится уже ко II в. [30, с. 219]. Погребение 232 расположено в восточном «лепестке» могильника, занимая место рядом с самыми ранними захоронениями со стеклом группы 3 (обесцвеченного сурьмой). По фибуле типа 2-3-Г оно может быть датировано не ранее последних десятилетий II в. [31]. Таким образом, к стеклу группы 3 эти образцы близки не только по геохимическим характеристикам, но и по хронологии.

Один образец (табл. 2, Фр-46) на основе данных СЭМ-ЭДС был интерпретирован как стекло, сваренное на основе золы растений-галофитов [2, с. 74]. По основному составу, как и по содержанию микро- и следовых элементов (прежде всего, титана – 0,16% TiO₂ и циркония – 78 ppm), данный образец близок т.н. группе *Magby*. Имея сходство с серией Фоу-2.1, она считается «первичной» группой стекла, происходящего из независимого стекловаренного центра. Данная группа была выделена на византийских стеклянных гирьках VI–VII вв. [29, р. 43, там же см. ссылки]. Считается, что «зольный компонент» добавлялся в стекло серии Фоу-2.1 или близкого ему по геохимическим характеристикам, не оказывая существенного влияния на ее состав; природа этого компонента остается неясна. В контекстах VI–VII вв. стекло *Magby* известно также в англо-саксонской Британии, в Царичин Граде в Сербии, во Франции в контекстах эпохи Меровингов и в визиготской Испании [ссылки на литературу см.: 29, р. 45]. Таким образом, находка из Фронтального 3 представляется едва ли не самой ранней, относящейся к данной группе. Погребение 91, из

³ В публикации 2022 г. данный образец ошибочно был отнесен к группе 9; сосуд абсолютно идентичного состава из того же погребения вошел в группу 7 (Фр-776) [2; 38].

которого она происходит, датируется второй половиной III – серединой IV в. на основании краснолаковой керамики [40, рис. 1].

По комплексу данных СЭМ-ЭДС и ЛА-ИСП-МС три образца, в т.ч. образец группы 9 (Фр-7) и образцы Фр-42 и 45, ранее определенные как близкие к левантийской 5 группе, по прежнему не могут быть отнесены ни к одной из выделенных групп. Образец Фр-10 занимает промежуточное положение между группами 6 и 7. Очевидно, они – также результат интенсивной вторичной переработки.

Сосуды «идентичного» состава. Ранее мы высказывали предположение, что в шести случаях пары сосудов абсолютно идентичного состава, происходящих из одного погребения (Фр-29 и 30; 33 и 34; 58 и 59; 776 и 80; 89 и 93; 126 и 127), изготовлены из единой порции стекла. Они, скорее всего, являются продукцией местного производства – в этом случае шансы пройти весь путь от мастерской до потребителя и в итоге оказаться в одном комплексе у них были выше, чем у далеких импортов – особенно с учетом того, что такой пример не единичен [38]. Данные по содержанию микроэлементов (табл. 2) не противоречат результатам изучения основного состава; наибольшие различия фиксируются при этом для элементов, маркирующих вторичное использование стекла и связанных с красителями (медь, свинец и др.). Возможно, это связано с тем, что попадавшие в стекломассу элементы из цветного стекла концентрировались в ней более локально и хуже «перемешивались» в ее составе.

Итоги. Данные, полученные методом ЛА-ИСП-МС, в целом подтверждают итоги исследования основного состава стекла, проведенного ранее методом СЭМ-ЭДС. При этом они уточняют и дополняют их, более полно и точно характеризую выделенные ранее группы.

Получил подтверждение вывод о сиро-палестинском и египетском происхождении стекла, обнаруженного в захоронениях могильника Фронтное 3, на более широком спектре элементов: мастерские, производившие посуду римского времени, находимую при раскопках в Юго-Западном Крыму, работали на привозном сырье из стекловаренных центров Восточного Средиземноморья.

Судя по уточненным данным, стекло левантийского происхождения не исчезает на рассматриваемой территории в середине IV в. Однако, если в ранней части могильника оно встречается преимущественно в «чистом» виде, то для комплексов IV в. характерно уже стекло «неоднозначного» состава, вероятно, переработанное совместно со стеклом египетских групп. Таким образом, сделанный ранее вывод о том, что стекло левантийского происхождения не подвергалось интенсивной переработке [6], может быть скорректирован – для позднего горизонта памятника он не актуален, хотя признаки этой практики далеко не всегда очевидны для этих материалов.

Уточнены характеристики стекла группы 7, ранее соотносимой преимущественно с серией Foу-2.1, широко распространенной в Центральной и Западной Европе в более поздний период. Установлены основные различия между ней и стеклом группы 7 Фронтного, предполагающие региональные различия в сырье египетских стеклоделательных центров IV и VI–VII вв.

Анализ стекла немногочисленной группы 8 показал, что лишь половина из относящихся к ней образцов может быть однозначно соотнесена с группой НИМТ. Подтвержден, таким образом, вывод о том, что стекло одной из наиболее популярных групп в европейских провинциях Римской империи не получило распространения в Юго-Западном Крыму, как и в некоторых других регионах Восточной Европы, для которых исследовался химический состав стекла.

Важным представляется выявление близости состава «зольного» стекла из Фронтного 3 и группы *Magby*; на сегодня это, возможно, один из самых ранних примеров подобного стекла на территории Европы, датирующийся второй половиной III – серединой IV в.

Наконец, анализ маркеров вторичной переработки в стекле групп, предположительно использовавшихся в стеклоделательном производстве в Херсонесе (группы 6, 7, 9 и, вероятно, группа 4), свидетельствует об интенсивном применении здесь этой практики, что типично для стеклоделательных мастерских, расположенных на периферии позднеантичного мира и испытывавших, очевидно, недостаток в «свежем» сырье.

Таблица 1. Результаты анализа эталонов NIST 610 и 612 методом LA-ICP-MS (в ppm)

Table 1. LA-ICP-MS analyses of NIST 610 and 612 glass standards (ppm), compared with reported values. Published values: after Normann [42]

Элемент	NIST 610					NIST 612				
	Аттестованное значение	Опубликованное [42]	Среднее значение	Станд. откл.	Станд. откл., %	Аттестованное значение	Опубликованное [42]	Среднее значение	Станд. откл.	Станд. откл., %
Li	488		485	20,37	4,20	40		43,5	3,30	7,58
Be			462	18,84	4,08			36,7	2,49	6,78
B	351		358	13,45	3,76	32		38,6	8,21	21,27
P			348	70,28	20,19			105,5	49,02	46,46
Sc		450	453	23,52	5,19		39,1	34,7	2,41	6,94
Ti	437		478	23,55	4,93	50,1		39,8	4,00	10,05
V		444	448	19,96	4,46		38,2	39,0	1,86	4,78
Cr	415		390	22,02	5,65	35		36,8	2,46	6,68
Mn	457		442	45,93	10,39	37,7		40,9	5,08	12,44
Co	390	388	391	15,92	4,07	35,5	33	32,5	1,87	5,75
Ni	458,7	415	419	21,10	5,04	38,8	34,5	34,3	2,61	7,61
Cu	444		437	21,35	4,88	37,7		35,9	2,78	7,73
Zn	433		431	22,85	5,30			37,4	6,11	16,35
Ga		431	434	17,31	3,99		35,9	36,0	1,96	5,43
As	340		318	19,34	6,08	37,4		33,4	3,60	10,76
Rb	425,7	430	434	20,70	4,77	31,4	32,2	35,2	2,29	6,51
Sr	515	525	530	25,51	4,82	78,4	79,3	78,3	4,02	5,13
Y		490	492	24,00	4,88		41,2	35,4	2,65	7,48
Zr		490	492	20,52	4,17		42,1	38,0	4,63	12,19
Nb		512	517	25,98	5,02		42,3	40,6	2,26	5,56
Mo			400	16,17	4,04			36,0	2,23	6,20
Ag	268		240	8,64	3,60	22		22,0	1,18	5,36
Cd	244		259	11,19	4,31	29,9		26,7	2,20	8,26
In			441	12,53	2,84			38,9	2,43	6,24
Sn			391	11,33	2,90			35,6	3,17	8,91
Sb	415,3		387	14,16	3,66	34,9		34,9	2,68	7,68
Cs		361	364	17,73	4,86		42,2	45,8	3,12	6,81
Ba	453	446	450	21,06	4,68	38,6	38,8	40,3	2,67	6,62
La		440	443	23,33	5,27	36	35,8	34,3	2,03	5,90
Ce		446	449	18,31	4,08	39	39,2	38,7	2,04	5,28
Pr		468	472	23,56	4,99		39	39,1	2,30	5,89
Nd		454	457	22,90	5,01	36	36,3	35,0	2,32	6,63
Sm		463	466	25,67	5,51	39	38	36,2	2,80	7,74
Eu		452	455	23,77	5,22	36	35,9	35,1	2,29	6,52
Gd		450	451	22,71	5,03		37,4	33,8	2,39	7,06
Tb			444	21,74	4,90			33,6	2,35	7,01
Dy		453	455	22,73	4,99	35	36,7	33,2	2,61	7,88
Ho		475	477	23,61	4,95		40,1	35,9	2,87	7,99
Er		463	465	23,21	4,99	39	38,8	34,7	3,02	8,71
Tm		479	456	23,26	5,10			34,3	2,81	8,22
Yb		479	481	24,47	5,09		40,5	36,1	2,75	7,62
Lu		467	469	23,80	5,08		38,7	34,6	2,70	7,80
Hf		458	460	23,43	5,10		38,5	34,5	2,70	7,83
Ta		490	493	26,26	5,33		40,5	37,4	2,68	7,16
Pb	426		416	21,71	5,22	38,57		40,6	2,95	7,28
Bi			372	14,86	3,99			34,1	2,12	6,22
Th	457,2	481	482	21,93	4,55	37,79	39,5	36,4	2,67	7,34
U	461,5	487	490	17,52	3,58	37,38	39,1	42,0	2,36	5,61

Table 2. Chemical composition of glass from Frontovoe 3 burial ground, studied with LA-ICP-MS technique

[illegible]

[illegible]

Группа стекла, обесцвечи- ватель	Шифр	Пор. / №	Li	Be	B	P	Sc	Ti	TiO ₂	V	Cr	Mn	MnO	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	As	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Sb ₂ O ₅	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Bi	Th	U																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
			ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	масс. %	ppm	ppm	ppm	масс. %	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	масс. %	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm

[illegible]

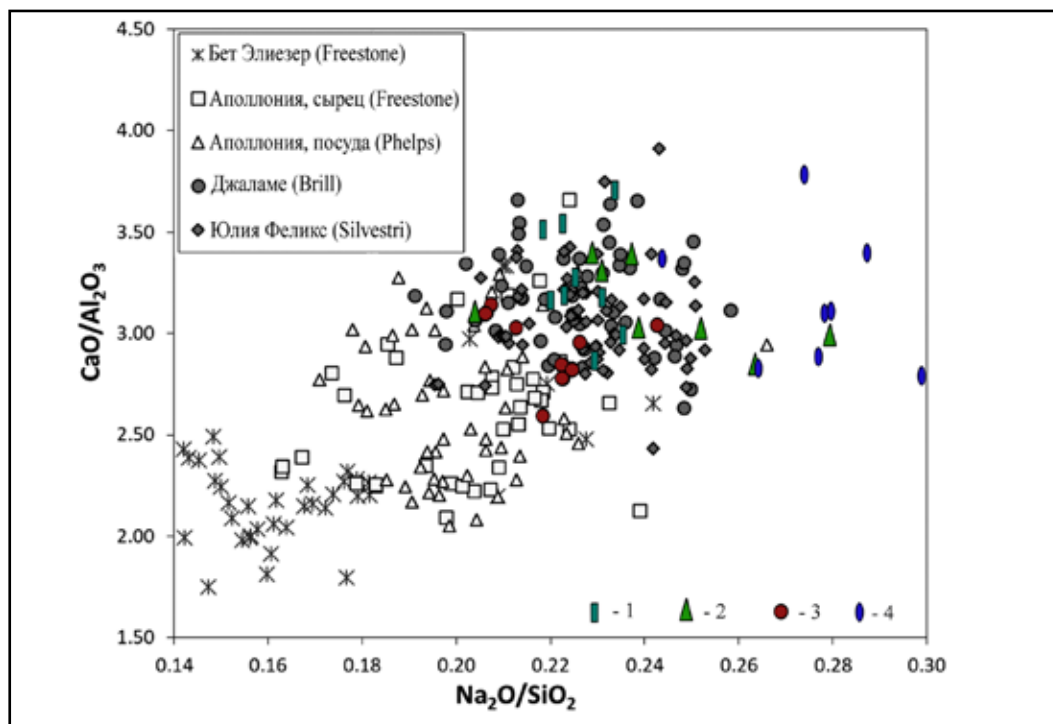
[illegible]

[illegible]

Таблица 3. Химический состав стекла образцов, изученный методом СЭМ-ЭДС, в масс % (образцы, не вошедшие в публикацию [2])**Table 3.** Chemical composition of glass studied with SEM-EDS technique, wt% (additional data, which was not published in [2])

Группа стекла	Шифр	Погр.	Описание	Цвет	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	CoO	CuO	SnO ₂	Sb ₂ O ₃	PbO
Гр. 3 (Foy-4, Sb) + Pb	Фр-22	погр. 73, № 635	бальзамария фр-т	б/ц прозр	18,58	0,49	1,68	69,55	<0,1	0,36	1,06	0,53	3,82	0,17	<0,1	0,63	<0,1	<0,1	<0,2	1,59	0,91
Гр. 4 (Mn+Sb)	Фр-26	погр. 98, № 810	гуттус	зелено-голубой	18,22	0,61	2,15	67,02	<0,1	0,29	1,11	0,62	7,11	<0,1	0,56	0,58	<0,1	<0,1	<0,2	<0,2*	<0,1
Гр. 8 (НИМТ)	Фр-63	погр. 142, № 1359	сосуда фр-ты	б/ц прозр	18,53	1,01	2,71	67,03	<0,1	0,23	1,11	0,58	4,83	0,24	1,87	1,16	<0,1	<0,1	<0,2	<0,2	<0,1

*0,19

**Рис. 1.** Стекло сиро-палестинского происхождения из Фронтového 3 в сравнении с разновременными материалами из Средиземноморского региона. Соотношение кальция, алюминия, натрия и кремния [по: 9]

Фронтového 3: 1 – группа 1 (римское зелено-голубое); 2 – группа 2 (римское обесцвеченное марганцем); 3 – группа 5 (Джаламе / левантийская 1 группа); 4 – образцы группы 9 с признаками сиро-палестинского происхождения

Fig. 1. Glass of Levantine origin from Frontovoe 3 compared with Mediterranean glass of various periods. Al₂O₃, CaO, Na₂O and SiO₂ ratios [after: 9]

Frontovoe 3: 1 – group 1 (Roman blue-green); 2 – group 2 (Roman decolourized with Mn); 3 – group 5 (Jalame / Levantine I); 4 – samples of the group 9 with the features of Levantine origin

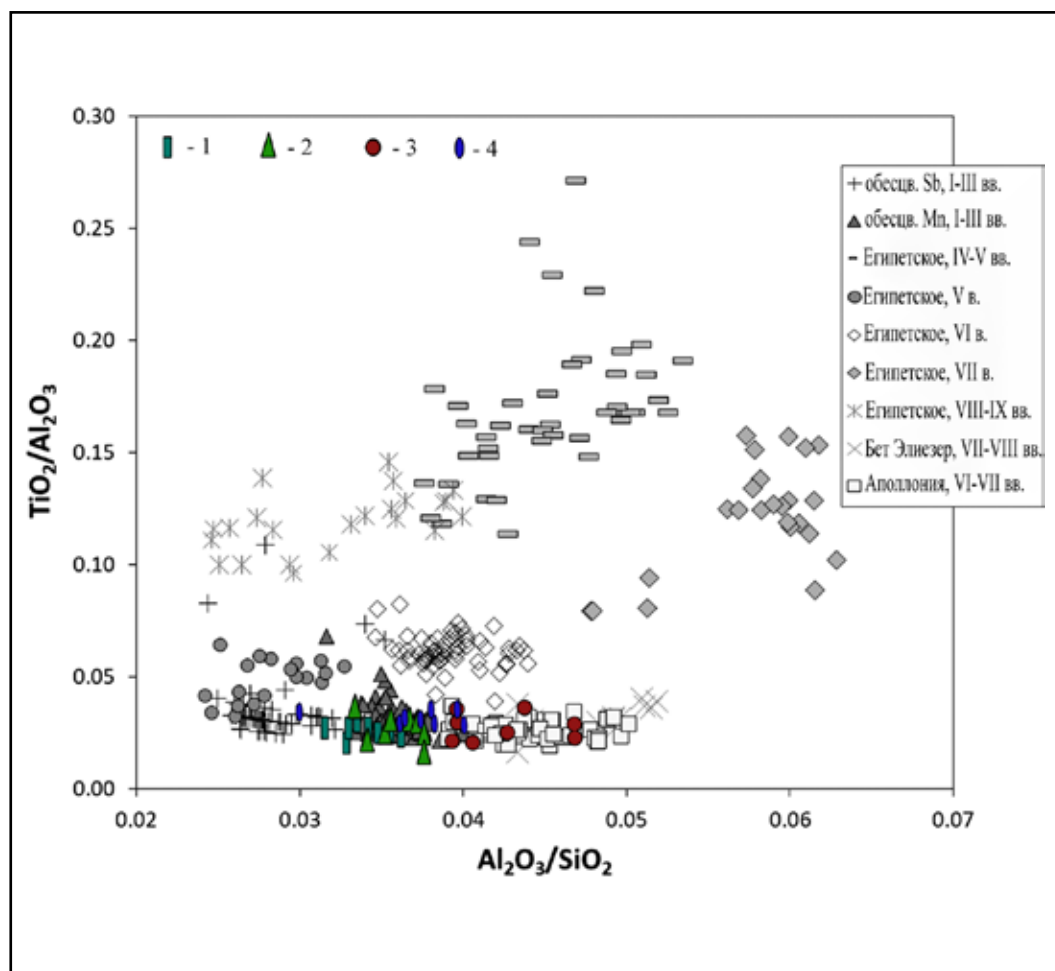


Рис. 2. Стекло сиро-палестинского происхождения из Фронтového 3 в сравнении с разновременными материалами из Средиземноморского региона.

Соотношение алюминия, титана и кремния [по: 9]

Фронтвое 3: 1 – группа 1 (римское зелено-голубое); 2 – группа 2 (римское обесцвеченное марганцем); 3 – группа 5 (Джаламе / левантийская 1 группа); 4 – образцы группы 9 с признаками сиро-палестинского происхождения

Fig. 2. Glass of Levantine origin from Frontovoe 3 compared with Mediterranean glass of various periods. Al_2O_3 , TiO_2 and SiO_2 ratios [after: 9]

Frontovoe 3: 1 – group 1 (Roman blue-green); 2 – group 2 (Roman decolourized with Mn); 3 – group 5 (Jalame / Levantine I); 4 – samples of the group 9 with the features of Levantine origin

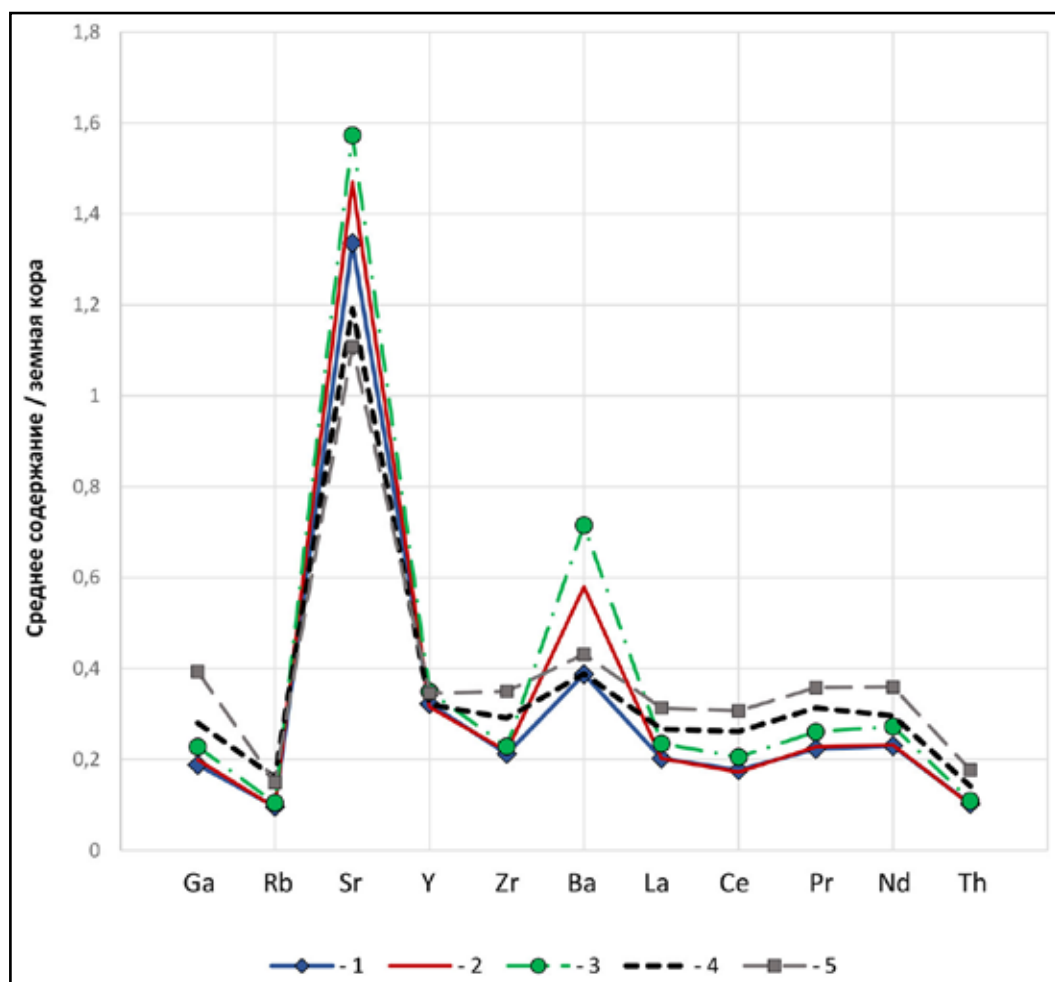


Рис. 3. Среднее содержание следовых элементов, характеризующих состав песка в стекле сиро-палестинского происхождения из Фронтového 3 и левантийских стекловаренных центров.

Содержания нормированы к земной коре [по: 13]

1 – Фронтového 3, группа 1; 2 – Фронтového 3, группа 2; 3 – Фронтového 3, группа 5;
4 – Аполлония (Израиль); 5 – Бет Элиезер (Израиль). 4, 5 – [по: 11]

Fig. 3. Mean concentrations of trace elements originated from the glassmaking sand, in the glass from Frontovoe 3 and Levantine glassmaking centres, normalized to the continental crust [after: 13]

1 – Frontovoe 3, group 1; 2 – Frontovoe 3, group 2; 3 – Frontovoe 3, group 5;
4 – Apollonia (Israel); 5 – Bet Eli'ezer (Israel). 4, 5 – [after: 11]

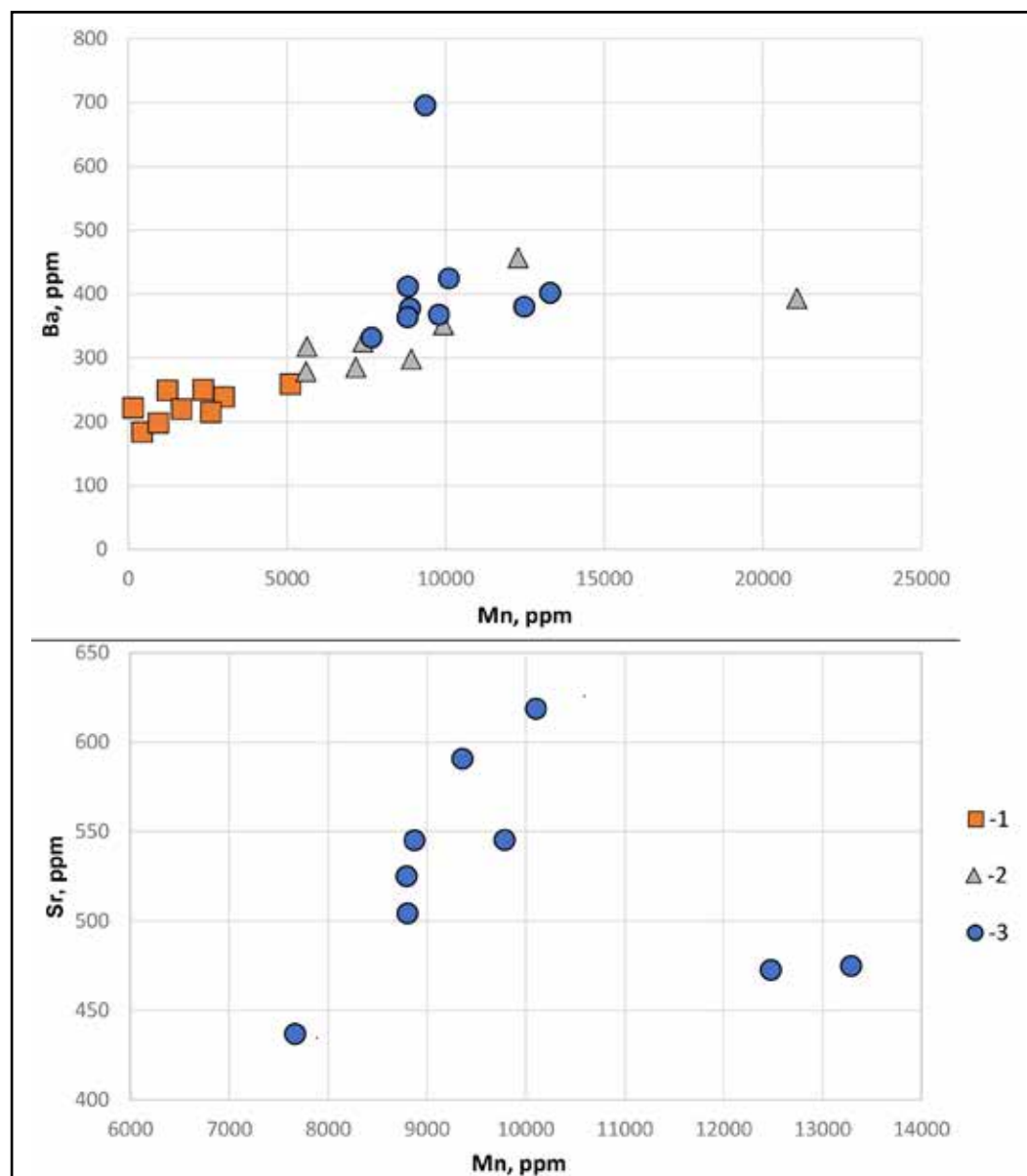


Рис. 4. Фронтное 3. Содержание марганца, бария и стронция в группах стекла сиро-палестинского происхождения
 1 – группа 1 (римское зелено-голубое); 2 – группа 2 (римское обесцвеченное марганцем);
 3 – группа 5 (Джаламе / левантийская I группа).

Fig. 4. Frontovoe 3. The concentration of manganese, barium and strontium in the groups of the Levantine origin
 1 – group 1 (Roman blue-green), 2 – group 2 (Roman Mn), 3 – group 5 (Jalame / Levantine I)

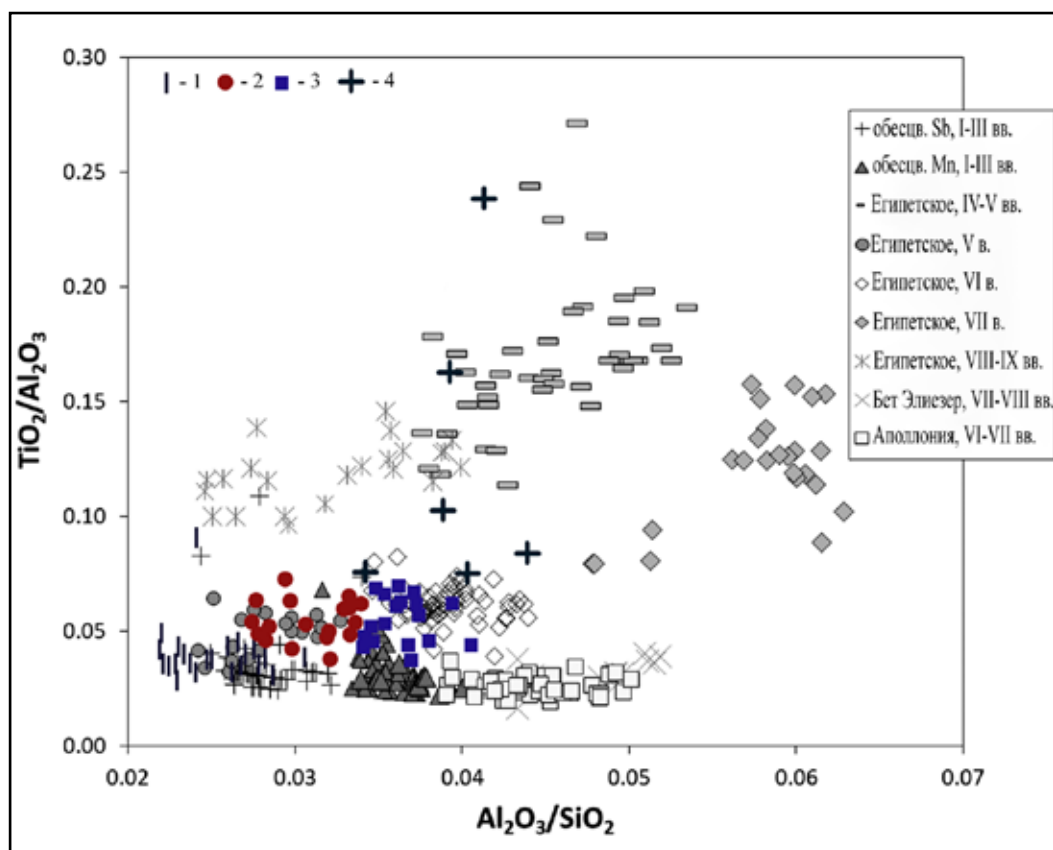


Рис. 5. Группы стекла египетского происхождения из Фронтowego 3 в сравнении с материалами Центральной и Западной Европы и Восточного Средиземноморья [по: 9]

1 – группа 3 (Foy-4); 2 – группа 6 (Foy-3.2); 3 – группа 7 (Foy-3.2/2.1);

4 – группа 8 (HIMT, HIMT/Foy-3.2/2.1)

Fig. 5. Glass of the Egyptian origin from Frontovoe 3 compared with the groups from Western and Central Europe and Eastern Mediterranean [after: 9]

1 – group 3 (Foy-4); 2 – group 6 (Foy-3.2); 3 – group 7 (Foy-3.2/2.1);

4 – group 8 (HIMT, HIMT/Foy-3.2/2.1)

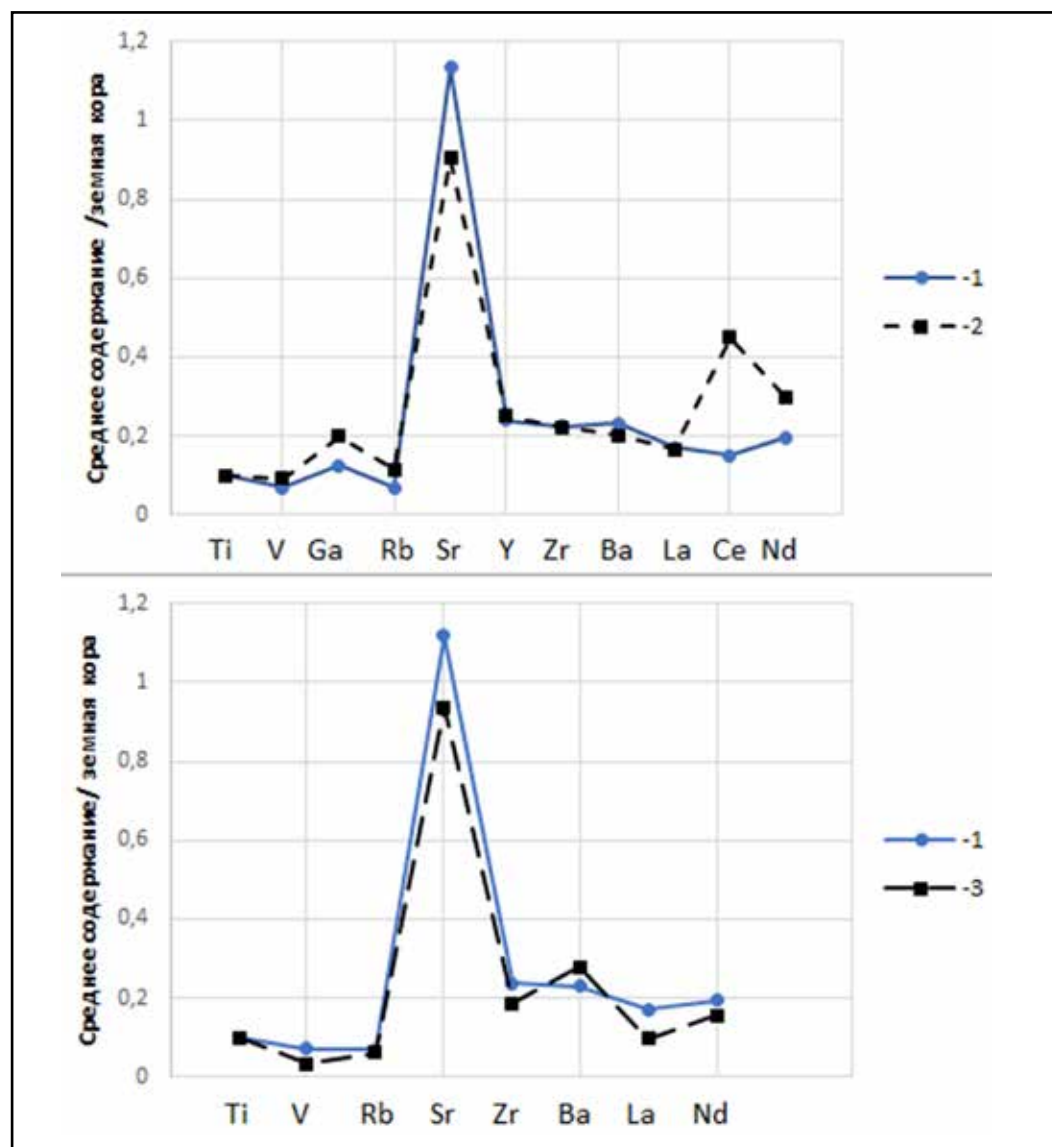


Рис. 6. Содержание следовых элементов, характеризующих состав песка, в стекле группы 3 из Фронтowego 3 в сравнении с материалами Юлия Феликс и Амбье.

Содержания нормированы к земной коре [по: 13].

1 – Фронтowego 3, группа 3 (группа Foy-4); 2 – Юлия Феликс [по: 7]; 3 – Амбье [по: 23].

Fig. 6. Mean concentrations of trace elements originated from the glassmaking sand, in the group 3 from Frontovoe 3 compared with the glass from Yulia Felix and Ovest Embiez.

Data are normalized to the continental crust [after: 13]

1 – Frontovoe 3, group 3 (Foy-4); 2 – Yulia Felix (CL1/1) [after: 7];

3 – Ovest Embiez (Foy-4) [after: 23]

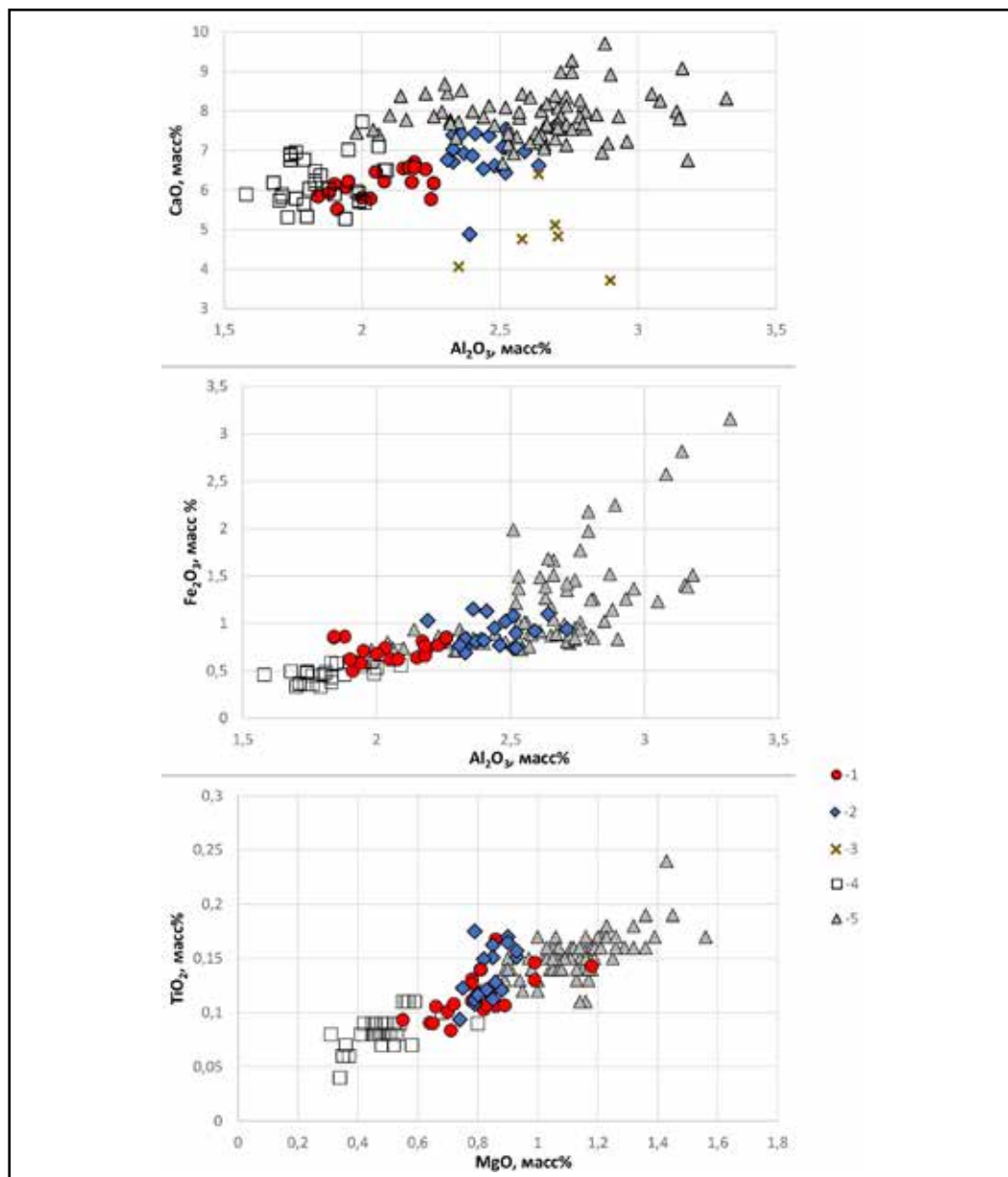


Рис. 7. Могильник Фронтвое 3, группы 6 и 7, в сравнении со стеклом серий Foy-3.2 и 2.1 с Нижнего Дуная. Соотношение оксидов кальция, алюминия, магния, железа и титана.

Группа 8, соотношение оксидов кальция и алюминия

1 – Фронтвое 3, группа 6; 2 – Фронтвое 3, группа 7; 3 – Фронтвое 3, группа 8;
4 – Нижний Дунай, серия Foy-3.2 [по: 34]; 5 – Нижний Дунай, серия Foy-2.1 [по: 15]

Fig. 7. Frontovoe 3, groups 6 and 7 compared with the glass of series Foy-3.2 and 2.1 from Lower Danube. CaO , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 and TiO_2 ratios. Frontovoe 3, group 8, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio
1 – Frontovoe 3, group 6; 2 – Frontovoe 3, group 7; 3 – Frontovoe 3, group 8; 4 – Lower Danube, series Foy-3.2 [after: 34]; 5 – Lower Danube, series Foy-2.1 [after: 15]

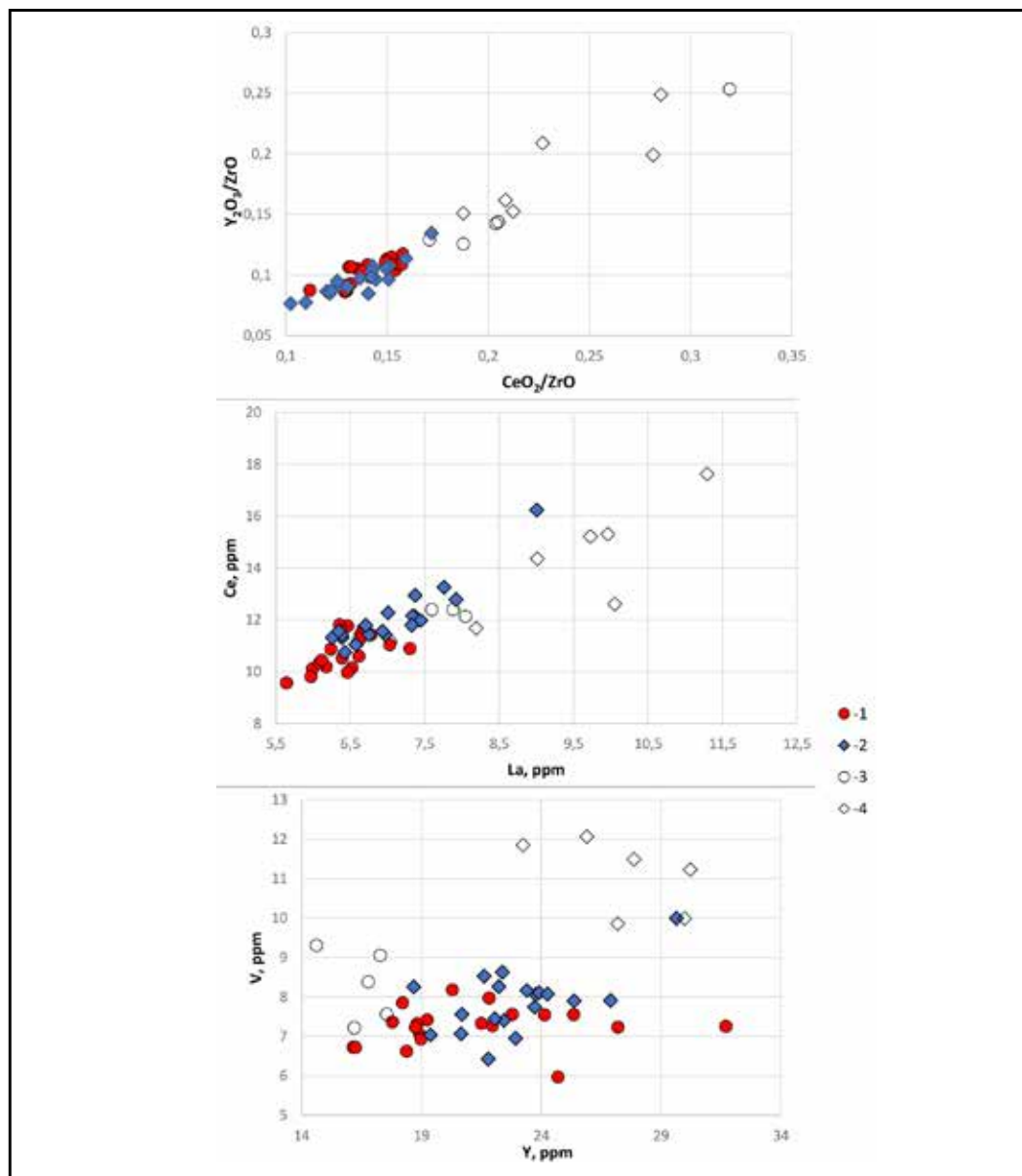


Рис. 8. Соотношение следовых элементов, характеризующих песок египетского происхождения, в стекле из Фронтового 3 и синхронного ему сыра с поселения Комаров черняховской культуры на Среднем Днестре
1 – Фронтовое 3, группа 6; 2 – Фронтовое 3, группа 7; 3 – Комаров, группа 2/Mn (Foy-3.2); 4 – Комаров, группа 3/Mn (Foy-3.2/2.1). 3, 4 – [по: 16]

Fig. 8. Content and ratios of trace elements originated from the Egyptian glassmaking sands. Data from Frontovoe 3 is compared with raw glass from the Cherniakhov-culture settlement of Komarov in the Middle Dniester, area

1 – Frontovoe 3, group 6; 2 – Frontovoe 3, group 7; 3 – Komarov, group 2/Mn (Foy-3.2); 4 – Komarov, group 3/Mn (Foy-3.2/2.1). 3, 4 – [after: 16]

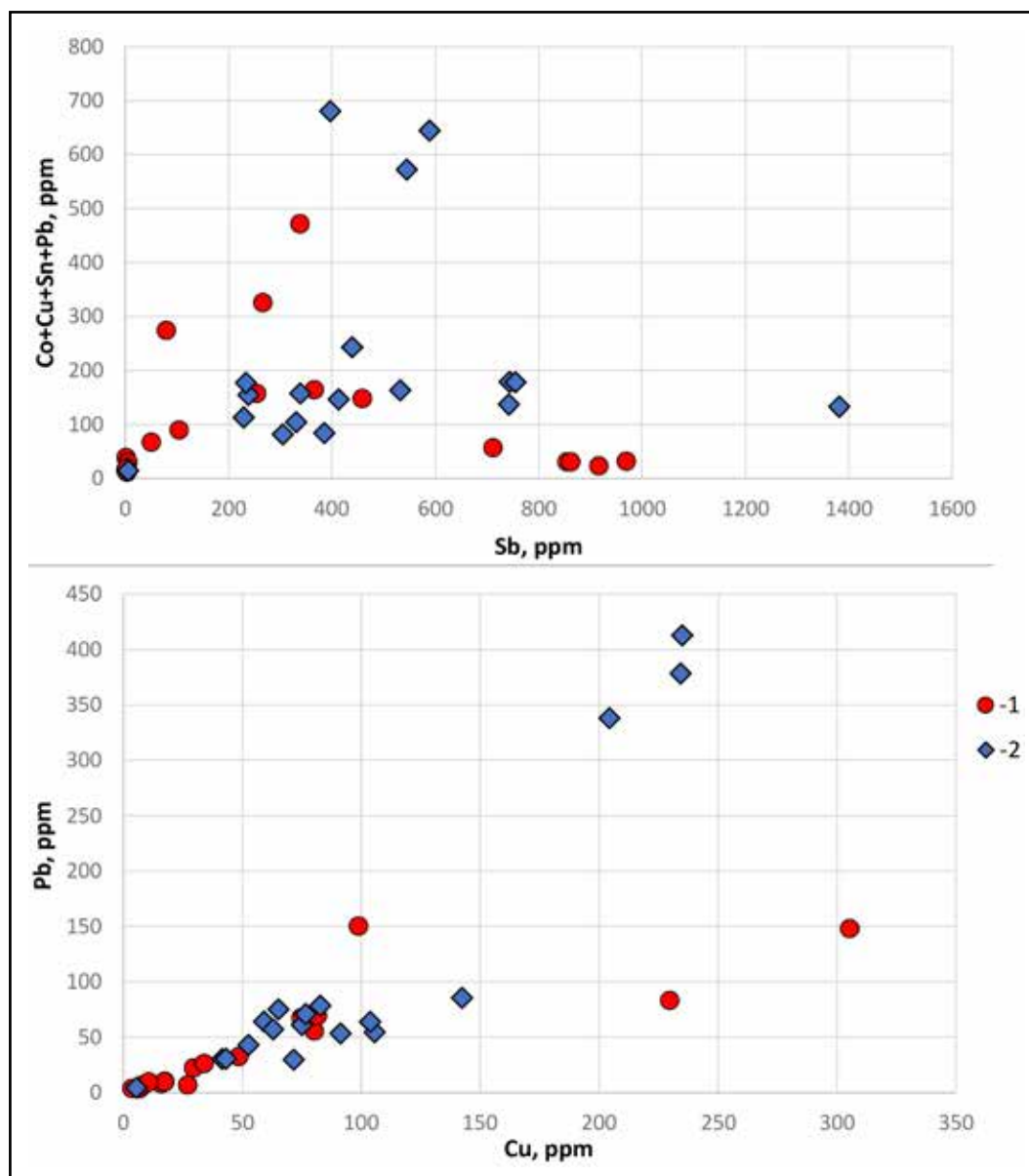


Рис. 9. Стекло групп 6 и 7.
Содержание элементов, маркирующих вторичное использование стекла
1 – группа 6; 2 – группа 7

Fig. 9. Glass of groups 6 and 7. Recycling markers' content
1 – group 6; 2 – group 7

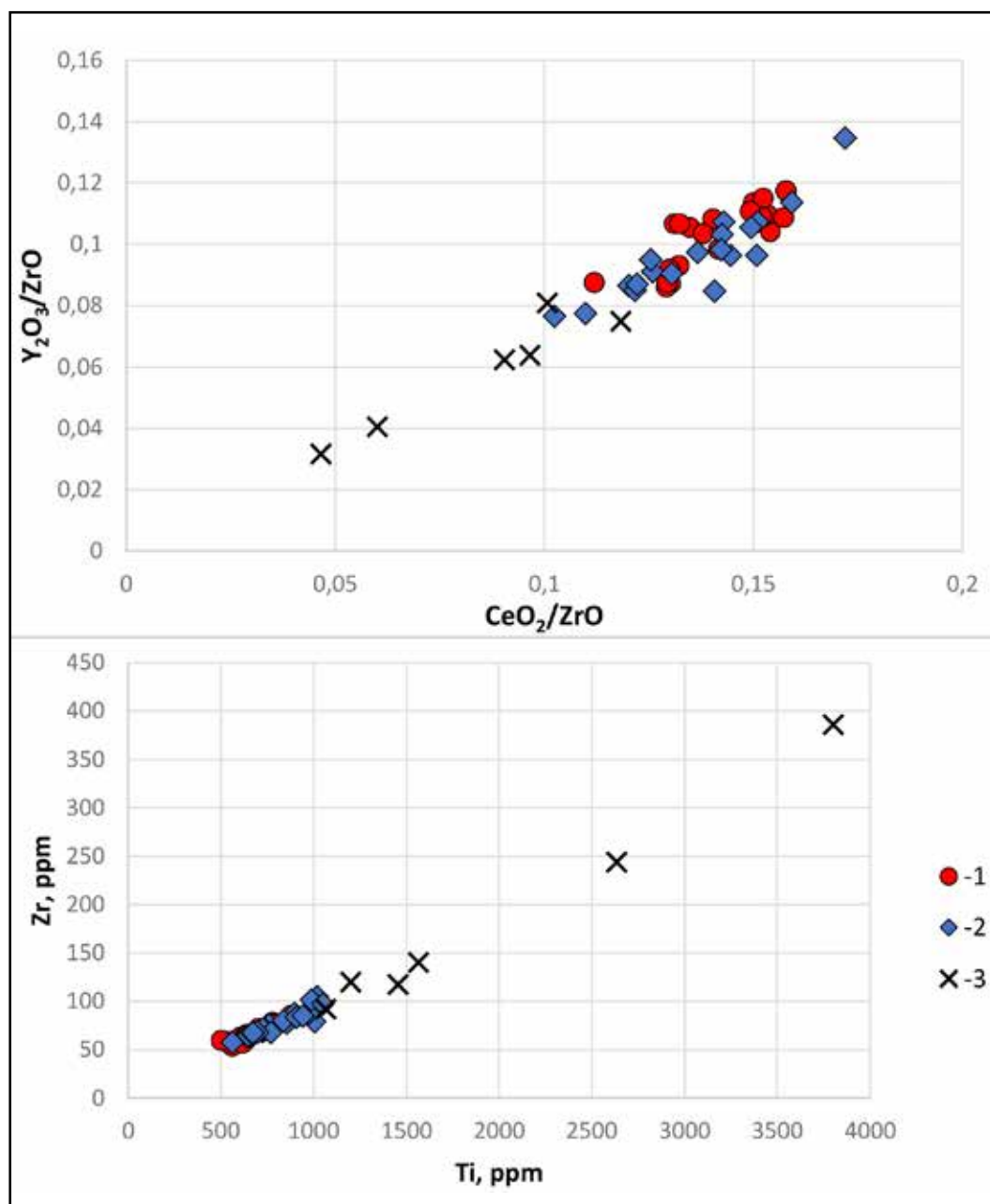


Рис. 10. Соотношение элементов, характеризующих песок, в стекле групп египетского происхождения
1 – группа 6; 2 – группа 7; 3 – группа 8

Fig. 10. Trace elements' content and ratios in the glass of the Egyptian origin.
1 – group 6; 2 – group 7; 3 – group 8

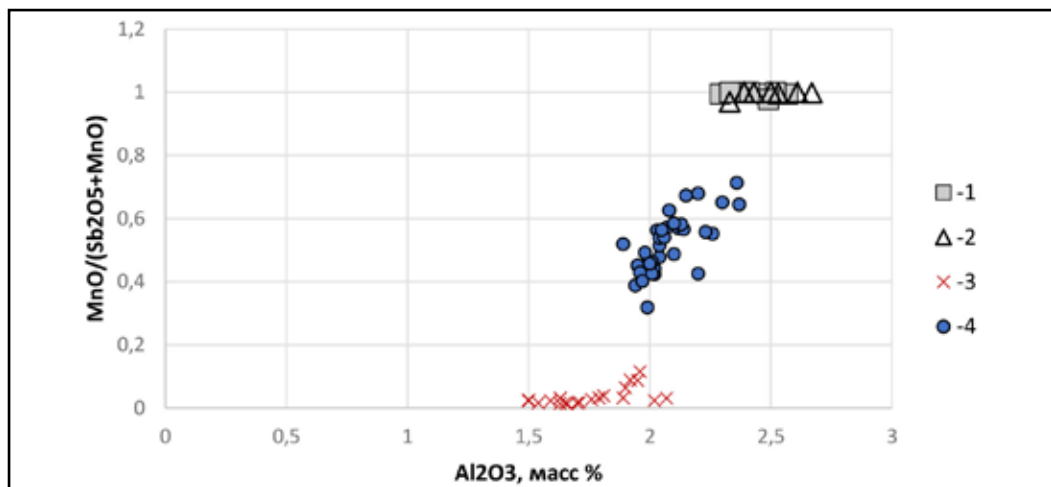


Рис. 11. Стекло групп левантийского (1, 2), египетского (3) происхождения и группа «смешанного» состава. Соотношение алюминия, марганца и сурьмы.

Номер значка на легенде соответствует номеру группы

Fig. 11. The glass of Levantine (1, 2) and Egyptian (3) origin and of the “mixed” composition. Aluminum, manganese, and antimony ratio.

The icon numbers in the legend correspond to the numbers of compositional groups

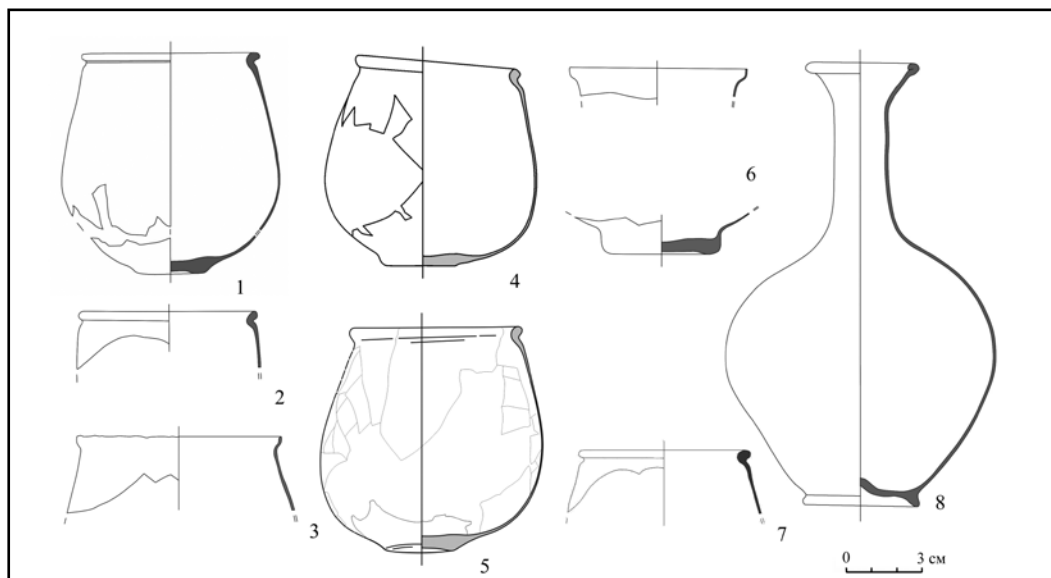


Рис. 12. Сосуды из стекла группы 9, близкого по составу сиро-палестинским группам
1 – погр. 5, № 141; 2 – погр. 41, № 812; 3 – погр. 91, № 118; 4 – погр. 86, № 1119;

5 – погр. 106, № 1272; 6 – погр. 38, № 1148; 7 – погр. 133, № 1292; 8 – погр. 99, № 1414

Рисунок А.В. Тяпухиной

Fig. 12. Vessels made of glass of the group 9 (compositionally close to the Levantine groups)
1 – burial 5, no. 141; 2 – burial 41, no. 812; 3 – burial 91, no. 118; 4 – burial 86, no. 1119;
5 – burial 106, no. 1272; 6 – burial 38, no. 1148; 7 – burial 133, no. 1292; 8 – burial 99, no. 1414
Drawing by A. V. Tiapukhina

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гавритухин И.О., Свиридов А.Н., Язиков С.В. Могильник римского времени Фронтное 3 в Юго-Западном Крыму (предварительное сообщение) // РА. 2020. № 2. С. 91–110. DOI: 10.31857/S086960630009075-1.
2. Румянцева О.С. Стекло могильника Фронтное 3 в Юго-Западном Крыму: хронология, динамика распространения и производственные центры // МАИЭТ. 2022. Вып. XXVII. С. 72–116. DOI: 10.29039/2413-189X.2022.27.72-116.
3. Румянцева О.С., Трифонов А.А., Ханин Д.А. Глава 15.1. Химический состав стекла эмалевых вставок и бус // Брянский клад украшений с выемчатой эмалью восточноевропейского стиля (III в. н.э.) / Отв. ред. А.М. Обломский. М.: ИА РАН; Вологда: Древности Севера, 2018. С. 199–220. (Раннеславянский мир. Вып. 18).
4. Jackson C. From Roman to early medieval glasses. Many happy returns or a new birth // Annales du 13e Congrès De l'Association Internationale Pour l'histoire Du Verre. Loche: AIHV, 1996. P. 289–301.
5. Freestone I.C. The Recycling and Reuse of Roman Glass: Analytical Approaches // Journal of Glass Studies. 2015. Vol. 57. P. 29–40.
6. Румянцева О.С., Червяковская М.В., Червяковский В.С. Вторичные практики стеклоделов в римское время по данным состава стекла могильника Фронтное 3 в Юго-Западном Крыму // Материалы по археологии и истории античного и средневекового Причерноморья. 2023. № 15. С. 336–397.
7. Silvestri A., Molin G., Salviulo G. The colourless glass of Iulia Felix // JAS. 2008. Vol. 35. P. 331–341. DOI: 10.1016/j.jas.2007.03.010.
8. Foster H.E., Jackson C.M. The composition of late Romano-British colourless vessel glass: glass production and consumption // JAS. 2010. Vol. 37. P. 3068–3080. DOI: 10.1016/j.jas.2010.07.007.
9. Freestone I.C. Apollonia glass and its markets: An analytical perspective // Tal O. Apollonia-Arsuf. Final report of the excavations. Vol. II. Excavations outside the Medieval Town Walls. Tel Aviv: Tel Aviv University, 2020. P. 341–348.
10. Freestone I.C. Glass production in the 1st millennium CE: a compositional perspective // Glas und Glasproduktion in Ur- und Frühgeschichtlicher Zeit / Eds. F. Klimscha, H.J. Karlsen, S. Hansen, J. Renn. Berlin: Edition TOPOI, 2021. P. 245–263.
11. Freestone I.C., Gorin-Rosen Y., Hughes M.J. Composition of primary glass from Israel // La route du verre: Ateliers primaires et secondaires de verriers du second millinaire av. J.-C. au Moyen-Age / Ed. M.-D. Nenna. Lyon: Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux, 2000. P. 65–84. (Travaux de la Maison de l'Orient méditerranéen 33).
12. 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 // JAS. 2016. Vol. 75. P. 57–71.
13. Wedepohl K.H. The composition of the continental crust // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1995. Vol. 59. P. 1217–1232.
14. Glass Making in the Greco-Roman World / Ed. P. Degryse. Leuven: Leuven University Press, 2014. 189 p. (Studies in Archaeological Sciences 4).
15. Cholakova A., Rehren T., Freestone I.C. Compositional identification of 6th c. AD glass from the Lower Danube // JAS: Reports. 2016. Vol. 7. P. 625–632. DOI: 10.1016/j.jasrep.2015.08.009.
16. Rumyantseva O., Trifonov A., Khanin D., Chervyakovskaya M., Chervyakovskiy V. Raw glass and glassworking practices beyond the Roman limes: A case study of the late Roman workshop in Komarov (Middle Dniester, Western Ukraine) // Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae. 2023. Vol. 74 (1). P. 51–69.
17. Gratuze B. Contribution à l'étude des verres décolorés à l'antimoine // Foy D., Labaune-Jean F., Leblond C., Martin Pruvot Ch., Marty M.Th., Massart C., Munier C., Robin L., Roussel-Ode J. Verres incolores de l'Antiquité romaine en Gaule et aux marges de la Gaule. Vol. 2. Typologie – Analyses. Oxford: Archaeopress, 2018. P. 349–382. (Archaeopress Roman Archaeology 42).
18. Jackson C., Foster H. The last Roman glass in Britain: recycling at the periphery of the empire // Neighbours and successors of Rome. Traditions of glass production and use in Europe and the Middle East in the later 1st millennium AD / eds. D. Keller, J. Price, C. Jackson. Oxford, Philadelphia: Oxbow, 2014. P. 6–14.
19. Nenna M.-D., Picon M., Thirion-Merle V., Vichy M. Ateliers primaires du Wadi Natrun: nouvelles découvertes // Annales du 16e Congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre (Londres, 2003). Nottingham: AIHV, 2005. P. 56–63.

20. Rosenow D., Rehren Th. Herding cats – Roman to Late Antique glass groups from Bubastis, northern Egypt // JAS. 2014. Vol. 49. P. 170–184. DOI: 10.1016/j.jas.2014.04.025.
21. Barfod G.H., Freestone I.C., Leshner C.E., Lichtenberger R.R. 'Alexandrian' glass confirmed by hafnium isotopes // Scientific Reports. 2020. 10 (1). DOI: 10.1038/s41598-020-68089-w.
22. Foy D., Fontaine S. L'épave Ouest Embiez 1, Var: le commerce maritime du verre brut et manufacturé en Méditerranée occidentale dans l'Antiquité // Revue Archéologique de Narbonnaise. 2007. Vol. 40. P. 235–268.
23. Ganio M., Boyen S., Brems D., Scott R., Foy D., Latruwe K., Molin G., Silvestri A., Vanhaecke F., Degryse P. Trade routes across Mediterranean: a Sr/Nd isotopic investigation on Roman colourless glass // Glass Technology: European Journal of Glass Science Technology. Part A. 2012. October. Vol. 53 (5). P. 217–224.
24. Румянцева О.С., Кадиева А.А., Демиденко С.В., Ханин Д.А., Червяковская М.В., Трифонов А.А. Стекланные изделия раннесредневековых могильников горной зоны центральных районов Северного Кавказа: химический состав и данные о происхождении // КСИА. 2019. Вып. 255. С. 32–49. DOI: 10.25681/IARAS.0130-2620.255.32-49.
25. Schibille N., Sterrett-Krause A., Freestone I.C. Glass groups, glass supply and recycling in late Roman Carthage // Archaeological and Anthropological Sciences. 2016. Vol. 9 (6). P. 1223–1241. DOI: 10.1007/s12520-016-0316-1.
26. Paynter S. Analyses of colourless Roman glass from Bilchester, County Durham // JAS. 2006. Vol. 33. P. 1037–1057.
27. 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.
28. Freestone I.C., Degryse P., Lankton J., Gratuze B., Schneider J. HIMT glass composition and commodity branding in the primary glass industry // Things that Travelled: Mediterranean Glass in the First Millennium CE / eds. D. Rosenow, M. Phelps, A. Meek, I. Freestone. London: UCL Press, 2018. P. 159–190.
29. Schibille N. Islamic glass in the making: Chronological and geographical dimensions. Leuven: Leuven University Press, 2022. 261 p. (Studies in Archaeological Sciences 7).
30. Суханов Е.В. Краснолаковая керамика конца I – первой половины III в. из могильника Фронтное 3 (хронологический и планиграфический анализ) // Stratum plus. 2021. № 4. С. 211–220. DOI: 10.55086/sp214211220.
31. Гавритухин И.О. Подвзанные лучковые фибулы из могильника Фронтное 3 (типология и хронология) // Могильник римского времени Фронтное-3: варвары на границах Империи / Ред. А.М. Мاستыкова. М.: ИА РАН, 2022. С. 22–42.
32. Romyantseva O., Lyubichev M., Petrauskas O., Chervyakovskaya M., Khanin D., Trifonov A. 'Barbarian' beakers with facet cut decoration: composition, origin, social and cultural context // Annales du 21ème Congrès de l'Association Internationale pour l'Archéologie du Verre / ed. U. Ozgumus. Istanbul: AIHV. 2021. P. 333–338.
33. Foy D., Picon M., Vichy M., Thirion-Merle V. Caractérisation des verres de la fin de l'Antiquité en Méditerranée occidentale: l'émergence de nouveaux courants commerciaux // Échanges et commerce du verre dans le monde antique. Actes du colloque de l'AFAV. Aix-en-Provence et Marseille, 7–9 juin 2001 / eds. D. Foy, M.-D. Nenna. Montagnac: Éditions Monique Mergoil, 2003. P. 41–85.
34. Cholakova A., Rehren T. A Late Antique manganese-decoloured glass composition: Interpreting patterns and mechanisms of distribution // Things that Travelled: Mediterranean Glass in the First Millennium CE / eds. D. Rosenow, M. Phelps, A. Meek, I. Freestone. London: UCL Press, 2018. P. 46–71.
35. Schibille N., Freestone I.C. Composition, Production and Procurement of Glass at San Vincenzo al Volturno: An Early Medieval Monastic Complex in Southern Italy // PLoS ONE. 2013. 8(10). e76479. DOI: 10.1371/journal.pone.0076479.
36. Verità M. Italian window glass chemical composition from the Roman time to the 18th century // Verre et Fenêtre de L'Antiquité au XVIIIe siècle: Actes du Premier Colloque International de L'association Verre & Histoire, Paris – La Défense – Versailles, 13–15 Octobre 2005 / Dir. S. Lagabrielle, M. Philippe. Paris: Verre et histoire, 2009. Электронный ресурс: http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p203_01_verita.html (дата обращения: 26.09.2023).
37. Гавритухин И.О., Мастыкова А.В., Свиридов А.Н., Суханов Е.В., Язиков С.В. Финал могильника Фронтное 3 (к изучению миграций в Юго-Западном Крыму на закате античности) // Stratum plus. 2020. № 4. С. 235–247.

38. Румянцева О.С. Состав стекла из могильника Фронтное 3 и локальное стеклоделательное производство в Юго-Западном Крыму // Могильник римского времени Фронтное-3: варвары на границах Империи / Ред. А.М. Мاستыкова. М.: ИА РАН, 2022. С. 54–62.
39. 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 // JAS. 2009. Vol. 36. P. 189–204. DOI: 10.1016/j.jas.2008.08.008.
40. Суханов Е.В., Гавритухин И.О., Нессель В. А. Краснолаковая керамика второй половины III – начала V в. из могильника Фронтное 3 // КСИА. 2021. Вып. 263. С. 441–456. DOI: 10.25681/IARAS.0130-2620.263.441-456.
41. Храпунов И.Н. Могильник Дружное (III–IV вв. н.э.). Lublin: Wydawnictwo uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, 2002. 313 С.
42. Norman M.D., Pearson N.J., Sharma A., Griffin W.L. Quantitative analysis of trace elements in geological materials by laser ablation ICP-MS: instrumental operating conditions and calibration values of NIST glasses // Geostandards and Geoanalytical research. 1996. Vol. 20. No. 2. P. 247–261.

REFERENCES

1. Gavritukhin I.O., Sviridov A.N., Yazykov S.V. The Roman Period Cemetery Frontovoe 3 in Southwestern Crimea (Preliminary Publication). *Rossiyskaya Archeologiya* [Russian Archaeology], 2020, no. 2, pp. 91–110. DOI: 10.31857/S086960630009075-1.
2. Rumyantseva O.S. Glass from the cemetery of Frontovoe 3 in the South-Western Crimea: the chronology, distribution dynamics, and production centres. *Materialy po istorii, arkhologii i etnografii Tavrii* [Materials in Archaeology, History and Ethnography of Tauria], 2022, vol. 27, pp. 72–116. DOI: 10.29039/2413-189X.2022.27.72-116.
3. Rumyantseva O.S., Trifonov A.A., Khanin D.A. Chapter 15.1. Chemical composition of enamels and glass beads. A.M. Oblomsky (ed.), *Bryanskiy klad ukrasheniy s vyemchatoy emaliyu vostochnoyevropeyskogo stilia (3 v. n.e.)* [The Bryansk hoard of enamelled jewellery in Eastern European style (3rd c. AD)], Moscow, IA RAS Publ., 2018, pp. 199–220.
4. Jackson C. From Roman to early medieval glasses. Many happy returns or a new birth. *Annales du 13e Congrès De l'Association Internationale Pour l'histoire Du Verre*, Loche, AIHV, 1996, pp. 289–301.
5. Freestone I.C. The Recycling and Reuse of Roman Glass: Analytical Approaches. *Journal of Glass Studies*, 2015, vol. 57, pp. 29–40.
6. Rumyantseva O.S., Chervyakovskaya M.V., Chervyakovskiy V.S. Glass recycling practices in the Roman period: a case study of the Frontovoe cemetery in South-Western Crimea. *Materialy po arkhologii i istorii antichnogo i srednevekovogo Prichernomor'ia* [Proceedings in Archaeology and History of Ancient and Medieval Black Sea Region] 2023, vol. 15, pp. 336–397.
7. Silvestri A., Molin G., Salviulo G. The colorless glass of Iulia Felix. *Journal of Archaeological Science*, 2008, vol. 35, pp. 331–341. DOI: 10.1016/j.jas.2007.03.010.
8. Foster H.E., Jackson C.M. The composition of late Romano-British colorless vessel glass: glass production and consumption. *Journal of Archaeological Science*, 2010, vol. 37, pp. 3068–3080. DOI:10.1016/j.jas.2010.07.007.
9. Freestone I.C. Apollonia glass and its markets: An analytical perspective. Tal O. *Apollonia-Arsuf. Final report of the excavations*. Vol. II. *Excavations outside the Medieval Town Walls*, Tel Aviv, Tel Aviv University, 2020, pp. 341–348.
10. Freestone I.C. Glass production in the 1st millennium CE: a compositional perspective. F. Klimscha, H.J. Karlsen, S. Hansen, J. Renn (eds.), *Glas und Glasproduktion in Ur- und Frühgeschichtlicher Zeit*, Berlin, Edition TOPOI, 2021, pp. 245–263.
11. Freestone I.C., Gorin-Rosen Y., Hughes M.J. Composition of primary glass from Israel. M.-D. Nenna (ed.), *La route du verre: Ateliers primaires et secondaires de verriers du second millinaire av. J.-C. au Moyen-Age*, Lyon, Maison de l'Orient et de la Méditerranée Jean Pouilloux, 2000, pp. 65–84. (Travaux de la Maison de l'Orient méditerranéen, 33).
12. 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, pp. 57–71.

13. Wedepohl K. H. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, pp. 1217–1232.
14. P. Degryse (ed.). *Glass Making in the Greco-Roman World*. Leuven, University Press, 2014, 189 p. (Studies in Archaeological Sciences, 4).
15. Cholakova A., Rehren T., Freestone I.C. Compositional identification of 6th c. AD glass from the Lower Danube. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 2016, vol. 7, pp. 625–632. DOI: 10.1016/j.jas-rep.2015.08.009.
16. Rumyantseva O., Trifonov A., Khanin D., Chervyakovskaya M., Chervyakovskiy V. Raw glass and glass-working practices beyond the Roman limes: A case study of the late Roman workshop in Komarov (Middle Dniester, Western Ukraine). *Acta Archaeologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 2023, vol. 74 (1), pp. 51–69.
17. Gratuze B. Contribution à l'étude des verres décolorés à l'antimoine. Foy D., Labaune-Jean F., Leblond C., Martin Pruvot Ch., Marty M.-Th., Massart C., Munier C., Robin L., Roussel-Ode J. *Verres incolores de l'Antiquité romaine en Gaule et aux marges de la Gaule*, Vol. 2, *Typologie – Analyses*. Oxford, Archaeopress, pp. 349–382 (Archaeopress Roman Archaeology, 42).
18. Jackson C., Foster H. 2014. The last Roman glass in Britain: recycling at the periphery of the empire. D. Keller, J. Price, C. Jackson (eds.), *Neighbours and successors of Rome. Traditions of glass production and use in Europe and the Middle East in the later 1st millennium AD*, Oxford, Philadelphia, Oxbow, pp. 6–14.
19. Nenna M.-D., Picon M., Thirion-Merle V., Vichy M. Ateliers primaires du Wadi Natrun: nouvelles découvertes. *Annales du 16e Congrès de l'Association Internationale pour l'Histoire du Verre (Londres, 2003)*, Nottingham, AIHV, 2005, pp. 56–63.
20. Rosenow D., Rehren Th. Herding cats – Roman to Late Antique glass groups from Bubastis, northern Egypt. *Journal of Archaeological Science*, 2014, vol. 49, pp. 170–184. DOI: 10.1016/j.jas.2014.04.025.
21. Barford G.H., Freestone I.C., Leshner C.E., Lichtenberger, Raja R. 'Alexandrian' glass confirmed by hafnium isotopes. *Scientific Reports*, 2020, 10 (1). DOI:10.1038/s41598-020-68089-w.
22. Foy D., Fontaine S. L'épave Ouest Embiez 1, Var: le commerce maritime du verre brut et manufacturé en Méditerranée occidentale dans l'Antiquité. *Revue Archéologique de Narbonne*, 2007, vol. 40, pp. 235–268.
23. Ganio M., Boyen S., Brems D., Scott R., Foy D., Latruwe K., Molin G., Silvestri A., Vanhaecke F., Degryse P. Trade routes across Mediterranean: a Sr/Nd isotopic investigation on Roman colourless glass. *Glass Technology: European Journal of Glass Science Technology Part A*, 2012, October, vol. 53 (5), pp. 217–224.
24. Rumyantseva O.S., Kadieva A.A., Demidenko S.V., Khanin D.A., Chervyakovskaya M.V., Trifonov A.A. Glass finds from the early medieval cemeteries in the mountainous areas of the North Caucasus central regions: Chemical composition and origin. *Kratkiye soobshcheniya Instituta arkheologii* [Brief Communications of the Institute of Archaeology], 2019, vol. 255, pp. 32–49. DOI: 10.25681/IARAS.0130-2620.255.32-49.
25. Schibille N., Sterrett-Krause A., Freestone I.C. Glass groups, glass supply and recycling in late Roman Carthage. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2016, vol. 9 (6), pp. 1223–1241. DOI: 10.1007/s12520-016-0316-1.
26. Paynter S. Analyses of colourless Roman glass from Bilchester, County Durham. *Journal of Archaeological Science*, 2006, vol. 33, pp. 1037–1057.
27. Foy D., Thirion-Merle V., Vichy M. Contribution à l'étude des verres antiques décolorés à l'antimoine. *Revue d'Archéométrie*, 2004, vol. 28, pp. 169–177.
28. Freestone I.C., Degryse P., Lankton J., Gratuze B., Schneider J. HIMT glass composition and commodity branding in the primary glass industry. D. Rosenow, M. Phelps, A. Meek, I. Freestone (eds.), *Things that Travelled: Mediterranean Glass in the First Millennium CE*, London, UCL Press, 2018, pp. 159–190.
29. Schibille N. *Islamic glass in the making: Chronological and geographical dimensions*. Leuven, University Press, 2022, 261 p. (Studies in Archaeological Sciences, 7).
30. Sukhanov E.V. Red-Slip Ware Ceramics of the End of the 1st – First Half of the 3rd Centuries from Frontovoe 3 Burial Ground (Chronological and Planigraphic Analysis). *Stratum Plus*, 2021, no. 4, pp. 211–220. DOI: <https://doi.org/10.55086/sp214211220>.
31. Gavritukhin I.O. The Bow-shaped Brooches with Returned Foot from the Cemetery of Frontovoe 3 (Typology and Chronology). A.M. Mast'ykova (ed.), *Mogil'nik rimskogo vremeni Frontovoe-3: varvary na granit-sakh Imperii* [The Roman Period Cemetery of Frontovoe 3: Barbarians at the Borders of the Empire], Moscow, IA RAS Publ., 2022, pp. 22–42.

32. Rumyantseva O., Lyubichev M., Petrauskas O., Chervyakovskaya M., Khanin D., Trifonov A. 'Barbarian' beakers with facet cut decoration: composition, origin, social and cultural context. U. Ozgumus (ed.), *Annales du 21ème Congrès de l'Association Internationale pour l'Archéologie du Verre*, Istanbul, AIHV, 2021, pp. 333–338.
33. Foy D., Picon M., Vichy M., Thirion-Merle V. Caractérisation des verres de la fin de l'Antiquité en Méditerranée occidentale: l'émergence de nouveaux courants commerciaux. D. Foy, M.-D. Nenna (eds), *Échanges et commerce du verre dans le monde antique. Actes du colloque de l'AFAV. Aix-en-Provence et Marseille, 7–9 juin 2001*, Montagnac, Éditions Monique Mergoïl, 2003, pp. 41–85.
34. Cholakova A., Rehren T. A Late Antique manganese-decolourised glass composition: Interpreting patterns and mechanisms of distribution. D. Rosenow, M. Phelps, A. Meek, I. Freestone (eds.), *Things that Travelled: Mediterranean Glass in the First Millennium CE*, London, UCL Press, 2018, pp. 46–71.
35. Schibille N., Freestone I.C. Composition, Production and Procurement of Glass at San Vincenzo al Volturno: An Early Medieval Monastic Complex in Southern Italy. *PLoS ONE*, 2013, 8(10), e76479. DOI: 10.1371/journal.pone.0076479.
36. Verità M. Italian window glass chemical composition from the Roman time to the 18th century. S. Lagabrielle, M. Philippe (dir.), *Verre Et Fenêtre de L'Antiquité Au XVIIIe Siècle: Actes Du Premier Colloque International de L'association Verre & Histoire, Paris – La Défense – Versailles, 13–15 Octobre 2005*. Paris, 2009. http://www.verre-histoire.org/colloques/verrefenetre/pages/p203_01_verita.html.
37. Gavritukhin I.O., Mastykova A.V., Sviridov A.N., Sukhanov E.V., Yazykov S.V. The Final of Frontovoe 3 Burial Ground (on the Study of Migrations in the South-Western Crimea in the Demise of Antiquity). *Stratum Plus*, 2020, no. 4, pp. 235–247.
38. Rumyantseva O.S. The Composition of Glass from the Cemetery of Frontovoe 3 and the Local Glass Working in the South-Western Crimea. A.M. Mastykova (ed.), *Mogil'nik rimskogo vremeni Frontovoe-3: varvar na granitsakh Imperii* [The Roman Period Cemetery of Frontovoe 3: Barbarians at the Borders of the Empire], Moscow, IA RAS Publ., 2022, pp. 54–62.
39. 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, pp. 189–204. DOI: 10.1016/j.jas.2008.08.008.
40. Sukhanov E.V., Gavritukhin I.O., Nessel V.A. Red-slip ware ceramics of the second half of the 3rd – early 5th centuries from the Frontovoe 3 cemetery. *Kratkiye soobshcheniya Instituta arkheologii* [Brief Communications of the Institute of Archaeology], 2021, vol. 263, pp. 441–456. DOI: 10.25681/IAR-AS.0130-2620.263.441-456.
41. Khrapunov I.N. *Mogil'nik Druzhnoe (III–IV vv. n.e.)* [The Cemetery of Druzhnoe (3rd–4th cc. AD)]. Lublin, Wydawnictwo uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej, 2002, 313 p.
42. Norman M.D., Pearson N.J., Sharma A., Griffin W.L. Quantitative analysis of trace elements in geological materials by laser ablation ICP-MS: instrumental operating conditions and calibration values of NIST glasses. *Geostandards and Geoanalytical research*, 1996, vol. 20, no. 2, pp. 247–261.

Информация об авторах

Румянцева О. С. – кандидат исторических наук, старший научный сотрудник Отдела археологии эпохи Великого переселения народов и раннего Средневековья Института археологии РАН, Researcher ID: ABF-6234-2021.

Червяковская М. В. – кандидат химических наук, научный сотрудник Института геологии и геохимии УрО РАН. Researcher ID: R-7997-2016.

Червяковский В. С. – младший научный сотрудник Института геологии и геохимии УрО РАН. Researcher ID: AAM-6433-2021.

Authors information

Rumyantseva O. S. – Candidate of Science (History), Senior Researcher of the Institute of Archaeology Russian Academy of Sciences, Researcher ID: ABF-6234-2021.

Chervyakovskaya M. V. – Candidate of Science (Chemistry), Researcher of the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Researcher ID: R-7997-2016.

Chervyakovskiy V. S. – Junior Researcher of the Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Researcher ID: AAM-6433-2021.