

И.С. Жуциховская, И.Ю. Буравлев

## КЕРАМИЧЕСКИЕ ЛИТЕЙНЫЕ ФОРМЫ ИЗ ПАМЯТНИКА КРУГЛАЯ ДОЛИНА В ПРИМОРЬЕ: ОПЫТ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-18-00081).*

Проведено комплексное исследование коллекции литейных форм из многослойного памятника Круглая Долина, относящихся предположительно к периоду государства Бохай, 698–926. Определены некоторые технологические особенности изготовления форм, позволяющие заключить, что изделия представляют продукцию разных мастеров. С помощью методов сканирующей электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионной спектроскопии (EDS), рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (pXRF) на поверхности керамических форм диагностированы следы металлов, входящих в состав бронзовых сплавов. Результаты анализов дают основание для предположений о соответствии состава сплавов, отливаемых в исследованные керамические формы, составу бронз из памятников бохайского времени в Приморье.

**Ключевые слова:** бронзолитейное производство; период государства Бохай; методы естественных наук; техническая керамика.

**Введение.** Одной из основных категорий древней технической керамики являются литейные формы. Их находки на археологических памятниках разного времени представляют значительный интерес как свидетельства металлообработки. Сложившаяся схема исследования этих артефактов включает морфологическую характеристику, реконструкцию типов отливок и определение технологических особенностей изготовления форм [1–3]. Использование современных физико-химических методов анализа позволяет получить информацию для идентификации состава и режима температурной обработки керамической массы литейных форм. Отдельным направлением исследований является диагностика следов металлов, из которых в керамических формах отливались изделия. Результаты идентификации приобретают особую научную ценность в тех случаях, когда литейные формы являются единственными свидетельствами металлообработки для изучаемого памятника или культуры [4–7].

В регионе Приморья известны два археологических памятника, на которых обнаружены литейные формы. На многослойном поселении Синие Скалы в восточном Приморье найдена серия каменных литейных форм, связанная с остатками бронзолитейной мастерской предположительно конца 1 тыс. до н. э.– рубежа эр. [8. С. 48–50]. Другое местонахождение – многослойный памятник Круглая Долина (Новогордеевское селище), рядом с городищем Круглая Сопка (Новогордеевское городище) в центральном Приморье (рис. 1). Найденная здесь серия керамических литейных форм связывается исследователями с остатками сильно разрушенного производственного комплекса, который, по предварительному определению, относится к периоду государства Бохай, 698–926. В комплексе бронзолитейного инвентаря, помимо литейных форм, входят также серия керамических лягушек и керамическое сопло. Исследователями была дана краткая характеристика литейных форм из Круглой Долины, однако до настоящего времени они не являлись предметом специального изучения [8. С. 53–72; 9].

Наша статья представляет опыт междисциплинарного подхода к исследованию керамических литейных форм. Коллекция керамических форм из селища

Круглая Долина анализируется с позиций традиционной морфологической систематизации и естественно-научных методик. Методы естественных наук использованы для получения информации о технологических особенностях изготовления форм и, что особенно важно, для идентификации следов металлических сплавов на их рабочих поверхностях. Задача статьи – представить полученные результаты, предложить их интерпретацию и наметить перспективы дальнейших исследований.

**Материалы исследования.** Коллекция керамических литейных форм, рассматриваемая в настоящем исследовании, включает 47 единиц, из них 26 – это целые и минимально поврежденные изделия; остальные экземпляры представлены фрагментами<sup>1</sup>. Все изделия относятся к категории разъемных форм многократного использования. Ранее исследователями отмечено, что среди них есть двусторонние формы для отливки круглых пуговиц (блях) с петелькой и односторонние с плоскими крышками, в которых отливались изделия типа подвесок и ажурные украшения [8. С. 71; 9].

Наиболее представительные серии в коллекции составляют целые и фрагментированные формы, предназначенные для отливки полусферических пуговиц, или блях, с петелькой (рис. 2, 1–4) и изделий, которые можно условно обозначить как подвески с двумя «хвостиками» (рис. 2, 5–7). Судя по сохранившимся образцам литейных форм, подвески с «хвостиками» имели несколько морфологических вариантов, однако их четкую систематизацию провести пока невозможно. Небольшой серией представлены формы для отливки ажурных украшений в виде розетки в круге (рис. 2, 8–10). В единственном экземпляре представлена половина односторонней формы для отливки изделия (подвески?) в виде «пучка» из трех узких длинных полосок (рис. 2, 11). В одном случае по сохранившемуся фрагменту можно предполагать отливку изделия в виде пластины с зубчатыми краями (рис. 2, 12).

Бронзовые изделия, отлитые в формах из Круглой Долины, не были обнаружены ни на этом памятнике, ни в культурном горизонте бохайского времени на соседнем городище Круглая Сопка (Новогордеевское

городище). В бохайских памятниках Приморья встречаются полусферические пуговицы-бляхи, однако этот тип бронзовых изделий, как отмечают исследователи, имеет широкий временной и территориальный диапазон [8. С. 71]. Единственная бронзовая подвеска, очень похожая на наши подвески с «хвостиками»,

найдена в северо-восточном Приморье, на памятнике Водораздельная, в культурном горизонте, предварительно определенном как раннесредневековый [10]. Бронзовые аналоги ажурных розеток, изделий в виде пластин с зубчатыми краями или «пучка» из длинных полосок в Приморье пока не известны.

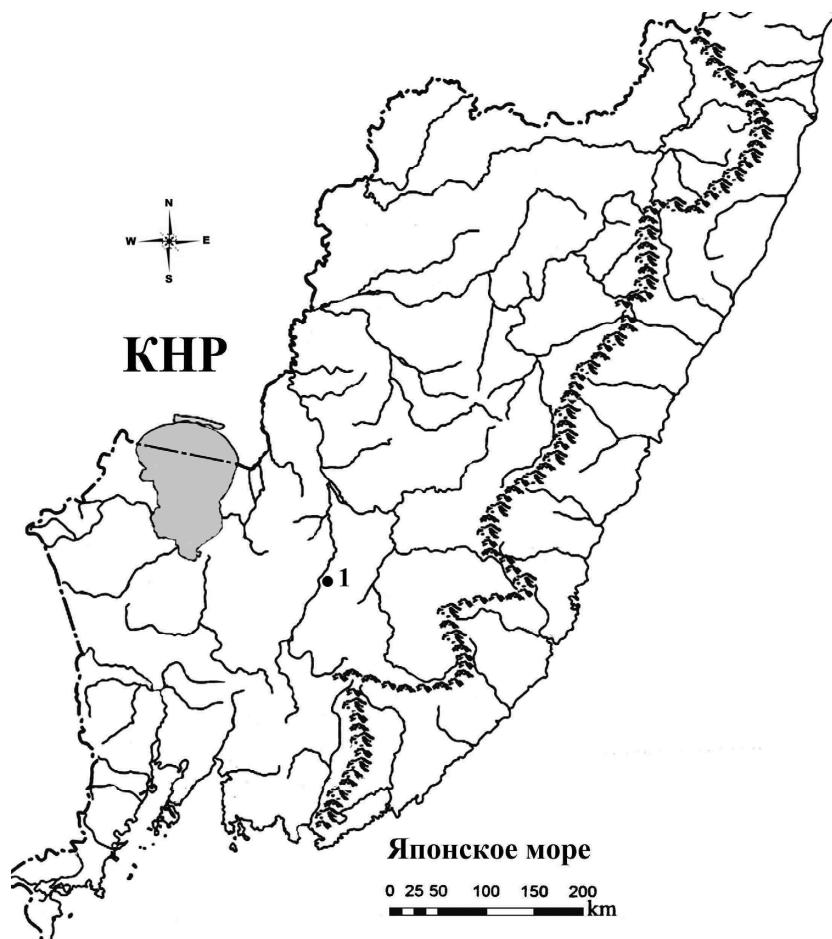


Рис. 1. Памятник Круглая Долина. Местоположение на карте Приморья

Следует особо отметить, что вскоре после раскопок все целые и часть фрагментированных литейных форм были покрыты в целях консервации тонким слоем клеевого вещества типа БФ-6. Наличие искусственного клеевого покрытия на изделиях было принято во внимание при отборе объектов для проведения исследований естественнонаучными методами.

У большинства целых и фрагментированных форм зона отливки и литника имеет темно-серую или черную окраску (зона припека), что является признаком насыщения керамической массы углеродом в процессе литья изделий. В нескольких случаях участки, соответствующие контуру отливок, видны на половинках форм, служивших крышками. У серии целых и фрагментированных половинок с оттисками для отливки все поверхности «чистые», без темных участков. Это может свидетельствовать о том, что данные формы были изготовлены, но по каким-то причинам не использованы для литья.

**Методы исследования.** Для проведения исследований с применением естественнонаучных методов были отобраны 34 образца литейных форм, из ко-

рых 13 – целые или минимально поврежденные изделия, остальные 21 в большей или меньшей степени фрагментированы. Объектам исследования (образцам форм) присвоены порядковые номера 1–34.

Характеристика формовочных масс, из которых изготовлены литейные формы, проводилась по участкам изломов у минимально поврежденных и фрагментированных изделий. Предварительный визуальный осмотр позволил выделить:

1) массу с преобладанием очень мелких непластичных включений, достаточно однородную – она отмечена у небольшого числа фрагментов;

2) массу с непластичными включениями разных размерных рангов, которая характерна для большинства фрагментов. Затем было проведено бинокулярное исследование аншлифов 12 объектов, представляющих эти вариации формовочной массы.

Метод исследования аншлифов позволяет определять текстурные особенности, количество и характер распределения минеральных и органических включений, количество и форму пустот (пор) и некоторые другие признаки формовочной массы [11, 12].

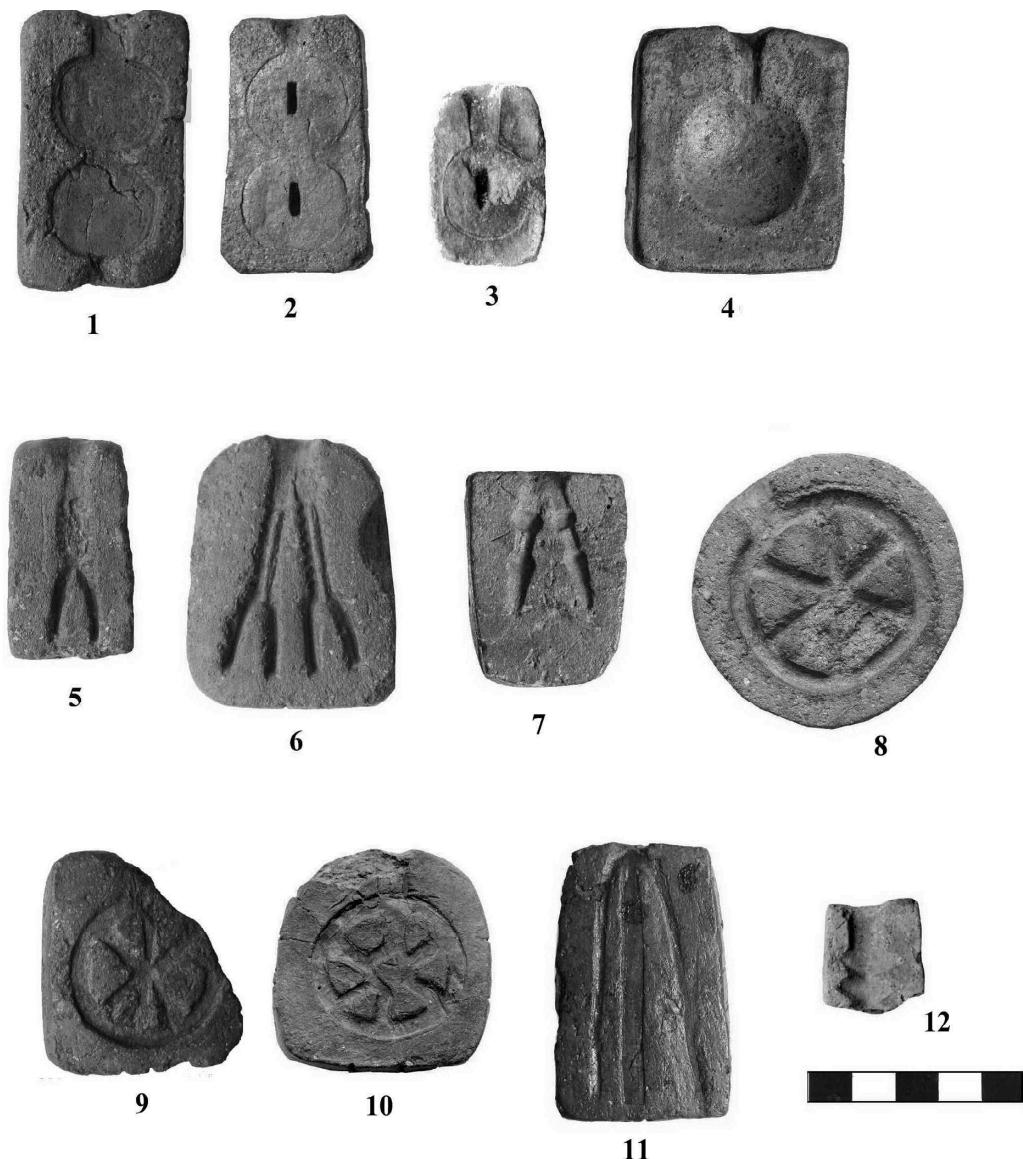


Рис. 2. Виды керамических литейных форм из памятника Круглая Долина

Для получения дополнительной информации об особенностях глинистого сырья использован метод повторного обжига в лабораторных условиях. Выдержка археологических образцов при 850°C в течение 30 минут позволяет выявить цвет глины в состоянии полного окисления. Как правило, разные глины обнаруживают свои особенности окраски после обжига. Это помогает определять видовой состав пластичного сырья, из которого изготовлены исследуемые керамические артефакты [13. Р. 23, 104–107]. Повторный обжиг при температуре 900°C был применен к 5 объектам (фрагментированным образцам). Этот метод хотя и не нарушает целостность археологического предмета, необратимо меняет его цветовую палитру. В тех случаях, когда исследуются редкие и ценные артефакты, повторный обжиг целесообразно применять лишь для ограниченных серий образцов. Особенно это важно для керамических литейных форм, у которых повторный обжиг приводит к исчезновению («выгоранию») науглероженных участков рабочей поверхности и к изменению физико-химических характеристик, что может негативно отразиться на ре-

зультатах диагностики следов сплавов на рабочих поверхностях.

Для получения информации о структурных трансформациях глинистого вещества в результате температурной обработки (обжига) в современной археометрии используется метод сканирующей электронной микроскопии (SEM). По степени витрификации глины можно судить о температурном режиме и качестве обжига изделий, в частности керамических литейных форм [5]. В настоящее время сканирующая электронная микроскопия достаточно успешно применяется в работе с первобытной и средневековой керамикой юга Дальнего Востока [14]. Данный метод был использован и в исследовании литейных форм из Круглой Долины. Также в целях получения информации о качестве обжига проведен лабораторный тест на определение показателя водопоглощения для нескольких фрагментированных изделий, не имеющих на поверхности клеевого покрытия. Этот показатель позволяет оценить, насколько хорошо спечен керамический череп в результате температурной обработки [13. Р. 125–130].

Для определения химического элементного состава вещества керамических литейных форм и диагностики следов сплавов, предположительно отливавшихся в них, в современных исследованиях используется энергодисперсионная спектроскопия (EDS), в частности, совмещенная с электронной микроскопией (SEM-EDS), энергодисперсионная рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (ED-XRF), рентгеновская флуоресцентная спектроскопия (XRF), рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (XRS). Эти методы отличаются высокой чувствительностью и являются неразрушающими, т.е. не требуют для проведения исследований нарушения целостности археологического образца. Следы вещества сплавов определяются на «рабочих» поверхностях керамических форм, т.е. на участках, которые в процессе литья непосредственно контактировали с металлом [4–6].

В нашем исследовании элементный анализ вещества поверхности керамических форм и идентификация вероятных следов сплавов осуществлялись методом энергодисперсионной спектроскопии на стацио-

нарной SEM-EDS установке EVO-40 и методом рентгеновской флуоресцентной спектроскопии с помощью портативного pXRF-анализатора Olympus Delta Professional DP 4000.

Исследованиям на SEM-EDS установке были подвергнуты 12 образцов (объектов), не покрытых kleem<sup>2</sup>. У серии объектов рабочая поверхность насыщена с разной степенью интенсивности углеродом (рис. 3). Это фрагменты двусторонних форм для отливки круглых пуговиц-блях (№ 15, 18, 20, 31, 33, 34), фрагмент односторонней формы для отливки, предположительно, парных подвесок с «хвостиками» (№ 13), фрагмент формы для отливки ажурной «розетки» (№ 23), фрагмент крышки, на одной из сторон которой участок, насыщенный углеродом, имеет размытые очертания отливавшихся изделий, предположительно парных подвесок (№ 25). Объекты без следов насыщения углеродом – это фрагменты половинок форм (№ 16, 22) и целая крышка односторонней формы (№ 26). Также измерения были проведены для «нерабочей» стороны объекта № 15, не имеющей следов науглероживания.

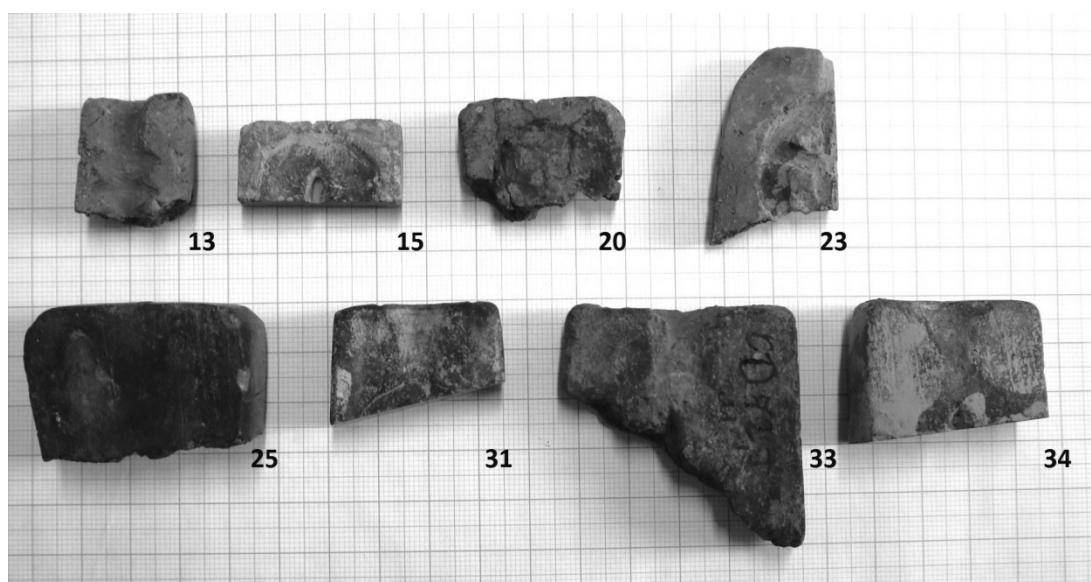


Рис. 3. Объекты, исследованные методом SEM-EDS: фрагменты керамических форм с признаками насыщения углеродом рабочей стороны. На фото указаны порядковые номера объектов

Съемка EDS-спектров для всех объектов проводилась в зонах вероятного соприкосновения керамической поверхности с металлом. Количество участков съемки для одного объекта – от 1 до 3, количество спектров соответственно – от 11 до 54. Метод EDS определяет содержание элементов в спектрах (в % от весового состава) на уровне полуколичественного анализа, имеющего ориентировочный характер. Для корректности наблюдений по количественным характеристикам учитывались значения от 1,0% и выше.

Метод pXRF позволяет анализировать сравнительно большие площади поверхности (10–20 мм), давая представление об усредненном по количественному показателю элементном составе, но имеет ограничения по количеству и точности определяемых элементов. Указанное ограничение не касается элементов, представляющих интерес в контексте нашего исследования, поскольку pXRF-анализатор использовался для локального ана-

лиза поверхности с целью определения остаточного присутствия элементов Pb, Cu, Sn и Zn. Даные, полученные pXRF-анализатором, дополняют данные SEM-EDS результатами анализа поверхностей, имеющих на себе kleевое покрытие. Была исследована серия из 34 объектов (целые и фрагментированные формы) как с покрытием, так и без него. Определения качественного элементного состава проводились на «рабочих» поверхностях форм в зоне отливки и на «нерабочих» участках (внешняя сторона, торцы). Количество измерений (спектров) для одного объекта – от 2 до 3, общее количество измерений для всей серии – 78.

**Результаты исследования.** В данном разделе представлена информация по морфологическим, технологическим характеристикам литейных форм и результатам определения элементного состава вещества рабочих поверхностей форм с целью идентификации следов сплавов.

*Морфологические характеристики.* Большинство форм из нашей коллекции имеет прямоугольные или прямоугольно-трапециевидные очертания, варьируя по пропорциям и размерам. Такие формы предназначались для отливки полусферических пуговиц и подвесок (рис. 2, 1–3, 5–7, 11). Параметр длины таких форм (в тех случаях, когда его можно зафиксировать точно) варьирует в пределах 4,0–7,0 см, ширина – от 2,0 до 4,5–5,0 см. Есть формы, по очертаниям близкие к квадрату. Они предназначались для отливки полу-сферических пуговиц (рис. 2, 4), ажурных розеток (рис. 2, 9). В одном экземпляре присутствует форма, по очертаниям представляющая нечто среднее между квадратом и кругом – для отливки розетки (рис. 2, 10). Также есть единственный экземпляр формы в виде круга диаметром 6,0 см – для отливки ажурной розетки (рис. 2, 8). Практически для всех экземпляров коллекции, как целых, так и фрагментов, может быть определен параметр толщины, варьирующий от 0,5 до 2,5 см, с преобладающими значениями 1,0–1,5 см.

*Технология изготовления.* Исследователи отмечали ранее, что литейные формы Круглой Долины изготовлены из глинистой массы со значительными примесями песка [7. С. 71; 8]. Наши данные позволяют уточнить это наблюдение. По результатам бинокулярного исследования аншлифов можно выделить две текстурные группы формовочных масс, соответствующие в целом тем вариациям, которые бы-

ли предварительно обозначены визуальным наблюдением.

Формовочная масса первой группы может быть условно названа тонко-текстурной (рис. 4, 1). При бинокулярном исследовании фиксируется большое количество зерен размером  $\leq 0,2$  мм, равномерно распределенных в массе и представляющих, скорее всего, естественную алевритовую примесь предположительно кварц-полевошпатового состава. Единичны включения размером 0,5–1,5 мм. Формовочная масса второй группы содержит значительное количество алевритовой примеси и непластичные включения размером 0,5–2,0 мм в количестве от 10–15% до 25–30%, достаточно равномерно распределенные в объеме массы. В большинстве случаев в составе непластичных включений присутствуют кварц, полевой шпат, редкие зерна осадочных пород, гематита (рис. 4, 2). В ряде случаев в составе непластичных включений размером 0,5–2,0 мм отмечается большое количество зерен гематита, зерна гранита, кварца, полевого шпата. Контуры зерен – угловатые или сглаженные. Минеральные включения размером  $\geq 0,5$  мм можно, вероятно, определять как искусственную примесь просеянной дресвы или слабоокатанного песка. Включения гематита являются, скорее всего, естественными примесями в глине. Ни в одной из групп не отмечены признаки включений органического происхождения (пустоты от выгоревшей растительной примеси, обломки раковин и др.).

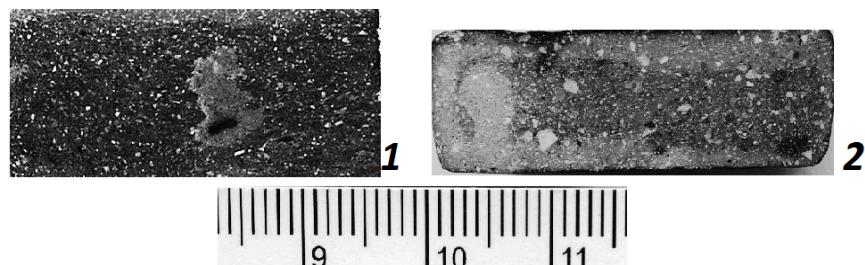


Рис. 4. Фото аншлифов. Формовочные массы керамики: 1 – первая группа; 2 – вторая группа

Повторный обжиг 5 фрагментированных образцов с формовочной массой второй группы проводился после того, как объекты были исследованы с помощью EDS и pXRF для диагностики следов сплавов на науглероженных участках поверхности (как отмечено выше, повторный обжиг удаляет углерод из керамики). Цвет полностью окисленных объектов № 6, 8, 11, 18 – насыщенный оранжево-красный, цвет объекта № 31 – светлый, оранжево-желтый. Этот результат можно интерпретировать как свидетельство того, что для изготовления форм использовались разные глины.

Поверхность керамических форм покрыта тонким слоем водно-глинистой обмазки и заглажена. Большинство форм имеет на торцевых длинных и коротких сторонах поперечные бороздчатые углубления шириной 1,0–2,0 мм, оставленные на еще пластичной массе, до обжига. Бороздки расположены на торцевых плоскостях слегка наклонно или вертикально (рис. 5). Очевидно, бороздки делались заранее для сцепления половинок формы во время литья при помощи, например, тонкой лесы или жилы. Плотное соединение двух половинок было технологически необходимо в процессе литья в форму [15].

В большинстве случаев в окраске керамических форм, за исключением науглероженной зоны отливки и литника, преобладают грязновато-желтые, блекло-оранжевые, светло-коричневые тона, свидетельствующие о первичном окислительном обжиге. Особую группу составляют 4 изделия, имеющих ровную интенсивно темную окраску всех поверхностей: 2 фрагмента форм для отливки, предположительно, подвесок с «хвостиками» (№ 8, 28), крышка односторонней формы (№ 1), фрагмент крышки с «теневыми» контурами отливок, предположительно, парных подвесок (№ 25). Изломы у фрагментированных объектов имеют бурый цвет. Темно-серая или черная окраска поверхности может быть результатом использования при обжиге приема «дымления», насыщающего керамику углеродом и окрашивающего ее в темный цвет.

Показатель водопоглощения, измеренный для нескольких объектов, находится в интервале 10,2–14,5%, что соответствует керамической массе среднего качества, достаточно плотной, но не относящейся к категории «каменной», или высокотемпературной, керамики [13. Р. 127–130]. Исследование на сканирующем электронном микроскопе поверхности прямо-

угольной половинки-крышки формы (№ 26) ровного оранжево-желтого цвета, без следов использования показало отсутствие признаков витрификации глини-

стого вещества. Это указывает на температуры обжига не выше 800–850°C, что согласуется с данными по водопоглощению.

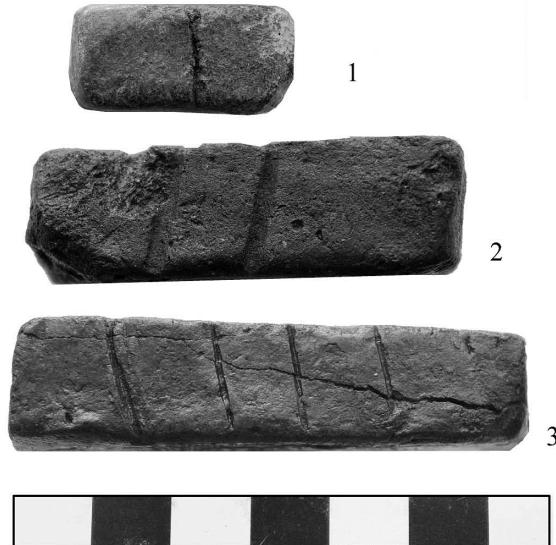


Рис. 5. Бороздчатые углубления на торцевых сторонах литейных форм

Между морфологическими параметрами, технологическими характеристиками литейных форм и видами отливавшихся в них изделий не прослеживается определенной связи. Так, формы для отливки полусферических пуговиц-блях варьируют по длине от 0,54 до 0,69 см, по ширине – от 0,28 до 0,57 см, по толщине – от 0,10 до 0,22 см. Конфигурация форм различна – удлиненно-прямоугольная, прямоугольно-трапециевидная, близкая к квадрату. Среди них есть образцы с формовочной массой как первой, так и второй групп. Размерные показатели форм для отливки подвесок «с хвостиками»: длина от 0,41 до 0,59 см, ширина – от 0,27 до 0,46 см, толщина – от 0,9 до 2,5 см. Конфигурация форм варьирует. Формовочные массы также различны.

**Элементный состав.** По результатам SEM-EDS для всех исследованных объектов основными компонентами являются элементы состава вещества глины и керамики – кремний (Si), алюминий (Al), калий (K), натрий (Na), кальций (Ca), магний (Mg), железо (Fe), титан (Ti). Для группы объектов со следами насыщения рабочих поверхностей углеродом в восьми случаях из девяти установлено присутствие в спектрах наряду с элементами, входящими в состав вещества, глины и керамики, элементов-металлов, которые можно связывать со следами сплавов. Это свинец (Pb), олово (Sn), медь (Cu) (табл. 1).

Таблица 1

#### Присутствие Pb, Sn, Cu в объектах, по данным SEM-EDS

Объект №	Элемент		
	Pb	Sn	Cu
13	+	+	+
15	-	+	+
20	+	-	-
23	-	-	+
25	+	+	-
31	+	+	-
33	+	-	-
34	+	+	-

*Примечание.* В таблице указаны данные по присутствию элементов-металлов с количественным показателем в спектрах ≥ 1,0%.

Наиболее постоянным элементом в EDS-спектрах является свинец. Его содержание варьирует в широких пределах с максимальными значениями 38,97% (объект № 34) и 52,56% (объект № 25). Содержание олова варьирует от 3,61% (объект № 13) до 33,86% (объект № 34), меди – от 2,02% (объект № 13) до 10,69% (объект № 15). На спектрограммах хорошо выражены пики свинца и общие пики свинца и кремния (рис. 6, 1). В некоторых случаях отмечаются выразительные пики олова (рис. 6, 2). Пики меди – наиболее слабые (рис. 6, 3). Можно отметить тенденцию к более высоким концентрациям олова по сравнению с медью. Цинк (Zn) выявлен только в 1 объекте (№ 20) и только в 1 спектре, его содержание очень незначительно (<0,5%), поэтому далее во избежание ошибочных интерпретаций этот элемент не рассматривается как потенциальный компонент сплавов.

Особо отметим присутствие мышьяка (As) в ряде объектов (№ 13, 31, 20, 25, 33). Этот элемент, не характерный для состава глин и керамики, интересен как потенциальный компонент (примесь) сплавов [8. С. 61, 74]. В одном случае (объект № 13) содержание мышьяка составляет до 1,36%, в других объектах его содержание измеряется в десятых и сотых долях процента. Также можно отметить присутствие бария (Ba) в концентрации до 2,0% в объектах № 20 и 25. Этот элемент известен как примесь в медных рудах, но может присутствовать и в осадочных глинистых породах [16].

Элементный состав EDS-спектров, снятых на рабочих сторонах объектов без признаков насыщения углеродом (№ 16, 22, 26), объекта № 18 со следами присутствия углерода, а также спектров «нерабочей» стороны объекта № 15, достаточно однороден и соответствует составу вещества глин и керамики. Исследование показало полное отсутствие в спектрах свинца, меди, олова, цинка, а также мышьяка и бария (рис. 6, 4).

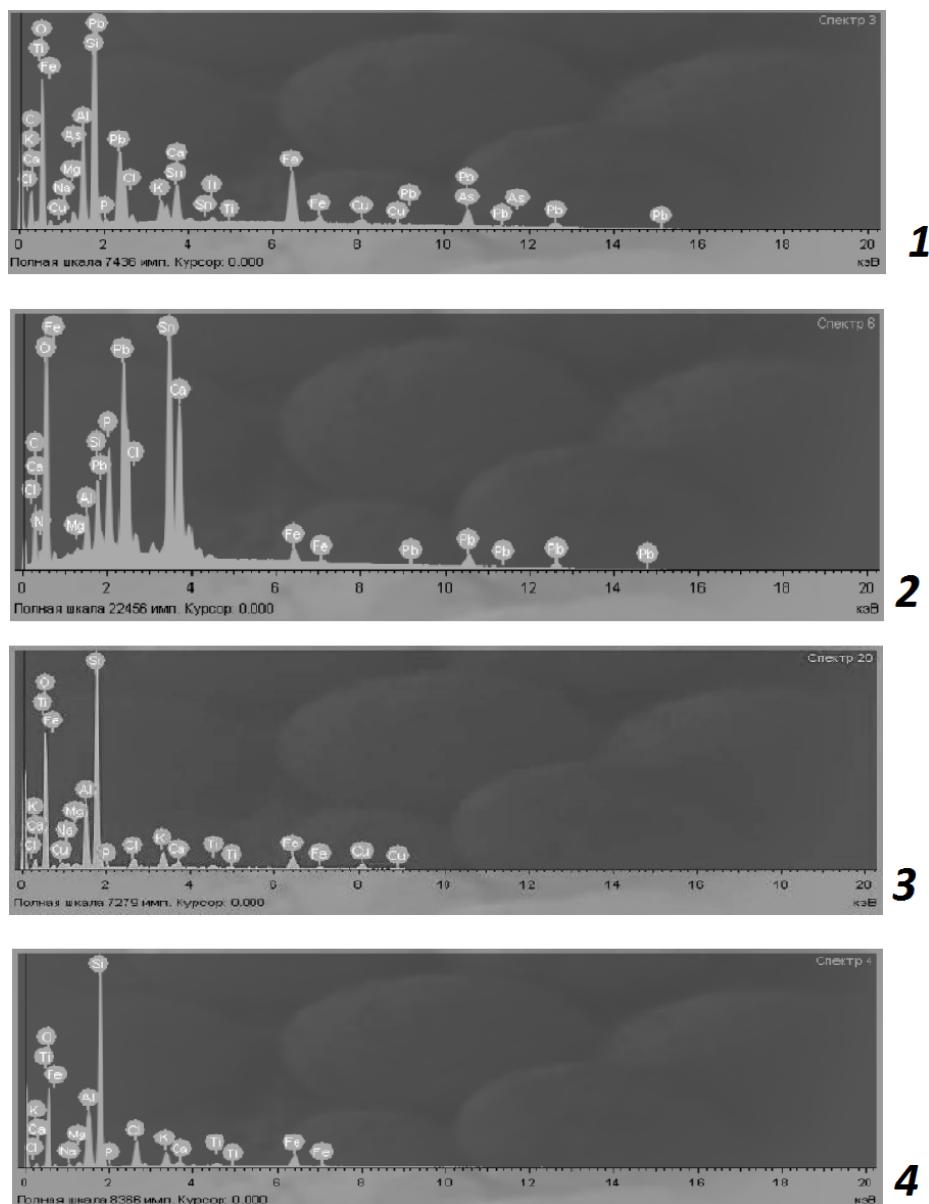


Рис. 6. Спектограммы: 1 – объект № 13, участок 1, спектр 3. В составе спектра – свинец (Pb), олово (Sn), медь (Cu), мышьяк (As); 2 – объект № 34, участок 1, спектр 6. В составе спектра – свинец (Pb), олово (Sn); 3 – объект № 23, участок 1, спектр 20. В составе спектра – медь (Cu); 4 – объект № 16, участок 1, спектр 4.

Содержание железа (Fe) в элементном составе объектов со следами использования составляет 4,88–21,39%, в составе объектов без следов использования – 7,89–24,97%. Данные показатели можно объяснить высокой степенью окжелезненности глинистого сырья, из которого были изготовлены литьевые формы. Как известно, для региона Приморья характерны глины с высоким содержанием железа.

Интересны данные по содержанию фосфора (Р) и кальция (Са) в составе EDS-спектров, полученных для объектов со следами использования и объектов без следов использования. Можно выделить две группы спектров – с низкой и высокой концентрацией фосфора и кальция. Низкая концентрация фосфора (до 1,12%) отмечена для объектов со следами использования, не содержащих свинец (№ 15, 23), и для всех объектов без следов использования. Высокая концентрация фосфора (от 3,22 до 11,63%) отмечается толь-

ко для объектов со следами использования, содержащих свинец (№ 13, 20, 25, 31, 33, 34). Низкая концентрация кальция (до 3,60%) отмечена в объектах без следов использования и в объектах со следами использования, не содержащих свинец (№ 15, 23). Высокая концентрация кальция (5,76–19,24%) отмечена в объектах со следами использования, содержащих свинец (№ 13, 20, 25, 31, 33, 34). Таким образом, наблюдается определенное соответствие между концентрациями фосфора и кальция и содержанием свинца в составе EDS-спектров. В этой связи особый интерес представляют данные по образцу № 31. На одном из двух участков съемки EDS-спектров высокие концентрации фосфора (11,34%) и кальция (17,24%) зафиксированы в точке, соответствующей минеральному включению угловатой формы (рис. 7, 8). Более детальное обсуждение этой ситуации представлено ниже.

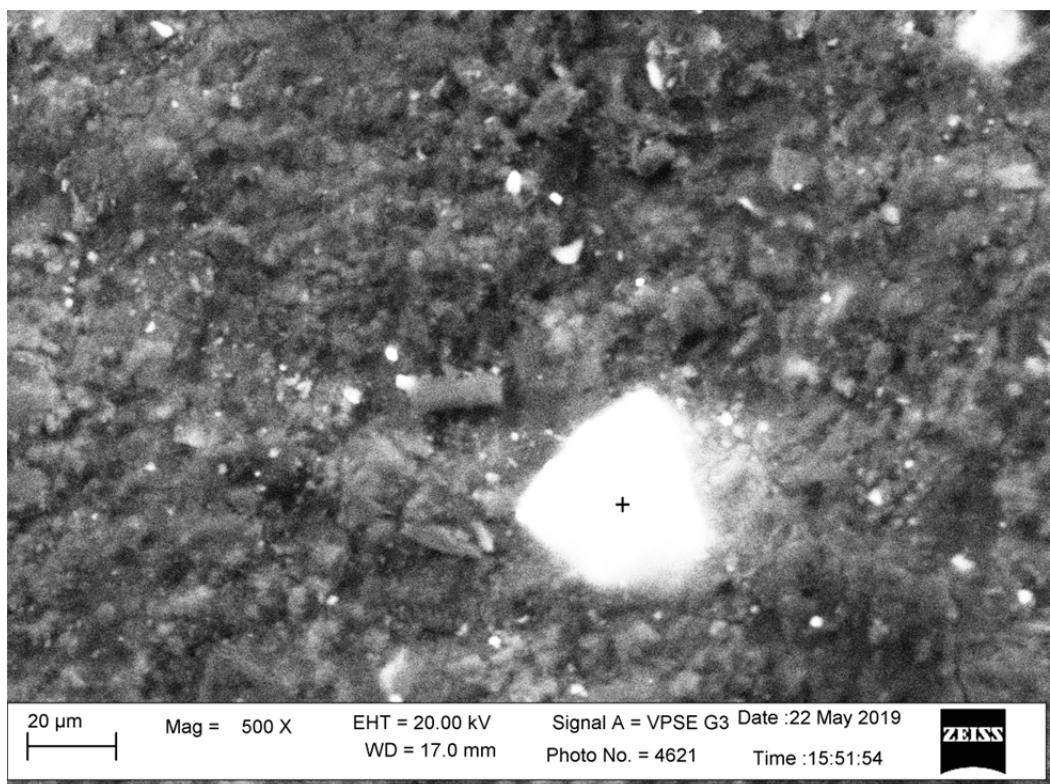


Рис. 7. Электронный скан: объект № 31, участок 1. В центре – включение угловатой формы (+), в составе которого диагностированы высокие концентрации фосфора (P) и кальция (Ca)

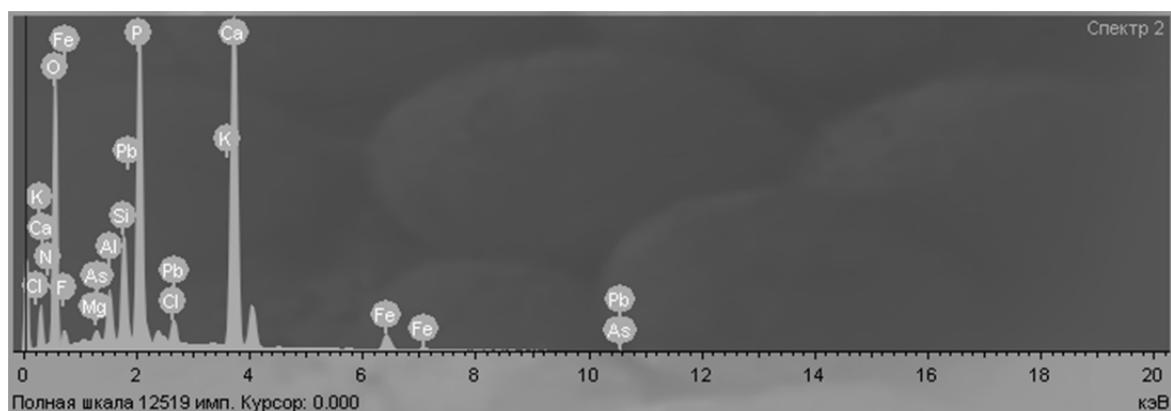


Рис. 8. EDS-спектр: объект № 31, участок 1, спектр 2. Точка снятия спектра соответствует минеральному включению угловатой формы (рис. 7)

Таблица 2  
Присутствие Pb, Sn, Cu в объектах, по данным pXRF

№ объекта	Элемент		
	Pb	Sn	Cu
1	+	-	-
2	+	-	-
3	+	-	-
4	+	-	-
5	+	-	-
8	+	-	+
13	+	+	+
25	+	-	-
28	+	-	+
31	+	-	-
33	+	-	+
34	+	+	-

Примечание. Объекты № 1–8, 28 имеют клеевое покрытие.

Исследование с помощью рXRF выявило для всех 34 объектов некоторые элементы основного состава глины и керамики – Si, Al, Fe, Ti. На рабочих сторонах 12 объектов диагностировано присутствие свинца, меди и олова (см. табл. 2). Рабочие стороны у всех 12-ти объектов имеют признаки науглероживания. Для остальных 22 объектов – как со следами насыщения углеродом, так и «чистые» – следы металлов на «рабочих» сторонах не были выявлены.

В целом результаты идентификации вероятных следов сплавов с помощью рXRF не противоречат данным, полученным методом SEM-EDS. Наиболее постоянным элементом является свинец, в нескольких случаях он встречен в сочетании с медью и/или оловом. Однако отметим, что между данными по диагностике элементов-металлов, проведенной для одних и тех же объектов методами EDS-анализа и рXRF, нет полного соответствия. В объектах № 15, 20, 23 энергодисперсионная спектроскопия выявила присутствие элементов-металлов, но с помощью рXRF эти элементы обнаружить не удалось. Далее, есть расхождения в составе элементов-металлов, установленном для некоторых объектов (№ 25, 31, 33, 34) методами EDS и рXRF (см. табл. 1, 2). Также в силу аналитических ограничений метода не был выявлен мышьяк, который удалось диагностировать с помощью EDS.

**Обсуждение результатов.** Материалом для изготовления наших литейных форм служило ожелезненное глинистое сырье с большим содержанием алевритовой фракции кварц-половошпатового состава. По результатам повторного обжига можно предполагать работу с разными, как минимум двумя, сортами глины. Иногда глина использовалась без каких-либо добавок, что обусловливало «тонкую» текстуру формовочной массы. Но чаще в пластичную массу добавлялись минеральные примеси, которые предварительно можно определить как песок, или смесь песка и дресвы. Известно, что в формовочную массу для технической керамики обычно вводились различные минеральные добавки, в частности песок, а также органические примеси [2, 3, 5, 17, 18]. Однако в составе форм из Круглой Долины следы органических включений не обнаружены.

Температурный режим обжига исследованных изделий позволял получать керамический материал среднего качества, удовлетворяющий задаче многократного использования форм для процесса отливки. Материал литейных форм близок по качеству черепу керамической посуды из памятников Приморья бахайского времени, к которому предположительно относятся остатки бронзолитейного комплекса. Однако в коллекциях бахайской керамики серийно присутствуют образцы и более высокого качества с показателем водопоглощения 5,0–10,0% и признаками витрификации глинистого вещества, что указывает на температуры обжига  $\geq 850^{\circ}\text{C}$  [14]. В этой связи интересна информация по обжигу керамических литейных форм из памятников Китая периода Восточного Чжоу (770–256 г. до н. э.). Исследователи отмечают, что литейные формы обжигались при температурах более низких, чем температуры обжига керамической посуды, составлявшие 800–1000 $^{\circ}\text{C}$  [5].

Наша коллекция литейных форм представляет, по-видимому, продукцию разных мастеров, практиковавших различные технологические стандарты изготовления керамических шаблонов для бронзовых отливок. Выявленные вариации в характере глинистого сырья, текстуре формовочных масс являются, вероятно, следствием разных предпочтений в работе с исходным материалом. Вариабельность размеров и конфигурации форм, особенно тех, что предназначались для отливки одинаковых предметов, также указывает на отсутствие общих стандартов. В плане диагностики технологического «почерка» на индивидуальном уровне интересна группа из 4 форм, обожженных с использованием приема «дымления». Общим признаком этих изделий является также значительная толщина (1,7–2,5 см), что выделяет их среди других исследованных объектов. Возможно, эти формы изготовлены в рамках одного технологического стандарта (изделия одного мастера или одной мастерской).

Исследование с помощью SEM-EDS и рXRF керамических форм с признаками использования в виде потемневших, науглероженных участков на «рабочих» поверхностях было в целом результативным в плане обнаружения элементов-металлов, которые можно интерпретировать как следы бронзовых сплавов. При этом в ряде случаев рXRF-анализатор оказался способным диагностировать искомые элементы даже для объектов с клеевым покрытием поверхности. Общее число объектов, на рабочих поверхностях которых выявлены следы вещества сплавов, составляет 15, т.е. почти 1/3 общего количества форм в коллекции и почти половина из исследованных 34 предметов.

Согласно экспериментальным разработкам зарубежных исследователей, следы металла, которые могут быть диагностированы на керамических литейных формах, по своему элементному составу не являются полными аналогами сплавов, отливавшихся в данных формах. Элементы Pb (свинец), Sn (олово), Cu (меди), Zn (цинк), важные с точки зрения идентификации состава бронзовых сплавов, определяются на керамической поверхности с разной степенью точности. Свинец наиболее надежно и легко поддается диагностике. Этот элемент образует устойчивые соединения с силикатами, являющимися основой керамического вещества. Соединения олова и меди с силикатами неустойчивые, «летучие», поэтому данные элементы диагностируются в значительно более слабой степени по сравнению со свинцом. Диагностика цинка также имеет свои особенности. В целом концентрации перечисленных элементов, выявленных на поверхности керамических форм, не будут соответствовать их концентрациям в исходных сплавах. Несмотря на это, даже сам факт присутствия на литейных формах следов металлов, входящих в состав бронзовых сплавов, представляет несомненный интерес в контексте изучения древней металлообработки [4].

Учитывая, что рассматриваемые керамические формы предполагали, очевидно, многократное использование, мы можем выявить с наибольшей вероятностью следы последних отливок. Результаты наших исследований с помощью EDS и рXRF согла-

суются с приведенными экспериментальными данными об особенностях диагностики разных элементов-металлов на поверхности керамических форм. Наибольшую частоту случаев обнаружения и наибольшие концентрации показывает свинец, для олова и особенно меди характерны заметно более слабые проявления. Мы не соотносим напрямую данные о количественных концентрациях свинца, олова и меди в спектрах с вероятными соотношениями этих элементов в составе сплавов. Речь идет только о фиксации наличия или отсутствия определенных элементов и их относительных концентрациях.

По данным анализа большой группы объектов (№ 1–5, 8, 13, 20, 25, 28, 31, 33, 34) можно сделать заключение об использовании сплавов, легированных свинцом (см. табл. 1, 2). Отмеченная выше неустойчивость меди и олова в соединениях с силикатами может объяснить тот факт, что только в одном объекте (№ 13) выявлен ряд из 3 элементов – свинца, меди и олова (см. рис. 6, 1). В объектах № 25, 31 и 34 помимо свинца, диагностировано олово (рис. 6, 2), для этих случаев, вероятно, можно говорить о присутствии меди «по умолчанию». Для объекта № 20, по данным EDS, и объектов № 8, 28 и № 33, по данным pXRF, были диагностированы свинец и медь (в объекте № 20 менее 1,0%). Эти результаты можно интерпретировать двояко: либо в состав сплава олово не входило изначально, либо следы этого элемента не удалось обнаружить в процессе анализа. По данным EDS, в объекте № 23 диагностирована только медь (рис. 6, 3), в объекте № 15 – медь и олово. Учитывая, что свинец образует с силикатами значительно более стойкие соединения, чем медь и олово, его отсутствие в EDS-спектрах, полученных для данных объектов, с большой долей вероятности может указывать на то, что этот элемент изначально не входил в состав сплавов.

Диагностированное с помощью EDS присутствие мышьяка в объектах, содержащих свинец (№ 13, 20, 25, 31, 33) указывает на то, что этот элемент, вероятно, входил в рецептуру сплавов. Хотя нельзя исключать присутствие геохимической примеси мышьяка в рудах, которые использовались для получения сплавов. Что касается присутствия бария в составе объектов № 20 и 25, этот элемент может быть предварительно интерпретирован как геохимическая примесь в медной руде. Основанием для такого предположения, во-первых, является факт отсутствия бария в составе объектов без признаков использования и без следов сплавов (№ 16, 17, 22, 26). Во-вторых, наш опыт SEM-EDS исследований показывает отсутствие бария в составе археологической керамики и глин Приморья.

Согласно Л.В. Коньковой, бронзовые сплавы, легированные свинцом, известны на юге Дальнего Востока с рубежа н.э. В бронзолитейном деле бахайского времени практиковались семь типов сплавов. Ведущую роль играли трехкомпонентные сплавы, содержащие медь, олово, свинец. В ряде случаев в состав этих сплавов входил мышьяк как специальная добавка. Также были идентифицированы: сплав, состоящий из меди и олова, и чистая медь [8. С. 60–63]. Наши результаты вполне согласуются с этими выводами. Можно достаточно уверенно говорить об от-

ливке в формах из Круглой Долины изделий из многокомпонентных сплавов, содержащих медь, олово, свинец и, вероятно, мышьяк в качестве добавки. Диагностика сплава из чистой меди (№ 23) и сплава из меди и олова (№ 15) носит пока предварительный характер. Для проверки данного предположения указанные объекты должны быть повторно проанализированы с увеличением количества участков и точек съемки EDS-спектров в границах сохранившихся рабочих поверхностей форм.

Отмеченное выше соответствие между концентрациями фосфора (P) и кальция (Ca) в составе вещества исследованных объектов представляет определенный интерес для обсуждения. Что касается фосфора, его присутствие в составе археологической керамики диагностируется достаточно часто. Причины этого явления могут быть различными. Невысокие концентрации фосфора обычно связаны с попаданием его в пористый материал из почвенного слоя, в котором длительное время находились артефакты [19]. Фосфор в небольших количествах – от десятых долей % до 1,0–3,0% – является постоянным элементом в составе керамики из археологических памятников Приморья, как показывают наши исследования с помощью SEM-EDS. Вероятно, незначительное содержание фосфора в составе вещества литейных форм без следов использования имеет такое же естественное происхождение. Однако высокие концентрации этого элемента на «рабочих» поверхностях со следами металлов, прежде всего свинца, должны иметь иное объяснение.

В определенной степени схожую ситуацию отмечим и для кальция. Этот элемент всегда присутствует в составе глин и, соответственно, в составе керамики. Для региона Приморья характерны глины с относительно низким содержанием Ca ( $\leq 5,0$ –6,0%), что согласуется и с данными анализов состава древней керамики [14]. Невысокие концентрации кальция в EDS-спектрах, снятых с поверхностей литейных форм без следов использования, связаны, очевидно, с составом керамического вещества. Но кальций в значительных концентрациях на участках, где выявлено присутствие металлов (свинца) и высокое содержание фосфора, имеет, по-видимому, иное происхождение. Данные наблюдения позволяют поставить вопрос о связи фосфора и кальция с составом сплавов и их следами на поверхности керамических литейных форм. Эта проблема требует специального исследования.

**Заключение.** Комплексное исследование литейных форм как одной из категорий древней технической керамики осуществлено в археологии Приморья впервые. Полученные результаты представляют интерес как продолжение разработки темы истории цветной металлургии и металлообработки на юге Дальнего Востока России. Особое значение имеет тот факт, что рассматриваемая коллекция керамических форм происходит из не стратифицированного, разрушенного археологического памятника, содержащего следы бронзолитейного производства предположительно бахайского времени.

Технологические и морфологические характеристики литейных форм из памятника Круглая Долина позволяют заключить, что формы были изготовлены

разными мастерами. Это согласуется с гипотезой о том, что в данном месте находился комплекс мастерских по производству бронзовых изделий [8. С. 71; 9]. Наиболее интересным и новаторским результатом изучения керамических форм можно считать обнаружение на их рабочих поверхностях следов металлических сплавов. Наш опыт подтверждает эффективность использования методов энергодисперсионной спектроскопии (EDS) и рентгеновской флуоресцентной спектроскопии (XRF) для диагностики элементов-металлов, входивших в состав древних бронз. Полученные данные позволяют предполагать соответствие сплавов, из которых отливались изделия в исследованных керамических формах, составам сплавов, известных в бронзолитейном производстве Бохая. Это заключение заслуживает особого внимания с учетом того, что для большинства видов бронзовых изделий, отливавшихся в формах из Круглой Долины, аналогии

на средневековых памятниках Приморья пока не обнаружены.

Как отмечалось выше, на памятнике Круглая Долина, помимо литьевых форм, найдены и другие артефакты, относящиеся к технической керамике – тигли со следами металла, сопло. В дальнейшем планируются исследования этих материалов с использованием комплекса методов естественных наук, что в совокупности с результатами изучения литьевых форм позволит получить новые данные по истории бронзолитейного производства на юге Дальнего Востока России.

*Авторы признательны Ю.Г. Никитину, зав. Музеем археологии и этнографии Института истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока за содействие и техническую помощь в подготовке статьи.*

#### ПРИМЕЧАНИЯ

<sup>1</sup> Коллекция литьевых форм из памятника Круглая Долина хранится в музее археологии и этнографии Института истории, археологии и этнографии народов Дальнего Востока ДВО РАН.

<sup>2</sup> Исследования проведены в Дальневосточном центре электронной микроскопии ННЦМБ ДВО РАН, г. Владивосток.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Кренке Н.А., Тавлинцева Е.Ю. Литейные формы с Дьякова городища // Российская археология. 2002. № 4. С. 90–110.
- Лопатина О.А. Технологическая характеристика глиняных литьевых форм Дьякова городища // Российская археология. 2002. № 4. С. 111–112.
- Дураков И.А., Кобелева Л.С. Техническая керамика кротовской культуры Центральной Барабы // Вестник Томского государственного университета. История. 2017. № 49. С. 23–25.
- Kearns T., Martinon-Torres M., Rehren Th. Metal to mold: alloy identification in experimental casting molds using XRF // Historical Metallurgy. 2010. Vol. 44, № 1. P. 48–58.
- Liu S., Wang K., Cai Q., Chen J. Microscopic study of Chinese bronze casting molds from the Eastern Zhou period // Journal of Archaeological Science. 2013. Vol. 40. P. 2402–2414.
- Zong Y., Yao Sh., Lang J., Chen X., et al. Structural and compositional analysis of a casting mild shard from ancient China // PLoS ONE. 2017. Vol. 12, № 3. P. 1–13.
- Molodin V.I., Myl'nikova L.N., Shterzer N.V., Durakov I.A., Drebushchak V.A. Thermogravimetry in the Studies of Ancient Technical Ceramics // Chemistry for Sustainable Development. 2019. Vol. 27. P. 101–108.
- Конькова Л.В. Бронзолитейное производство на юге Дальнего Востока СССР. Рубеж II–I тыс. до н.э. – XIII век н.э. Л. : Наука, 1989. 123 с.
- Леньков В.Д., Семениченко Л.Е., Хорев В.А., Следы металлургического производства на раннесредневековом поселении в долине р. Арсеньевка // Вопросы истории и культуры народов Дальнего Востока. Владивосток, 1974. Вып.2. С. 96–103.
- Татарников В.А. Стоянка Водораздельная – новый памятник Северо-Восточного Приморья // Материалы по археологии Дальнего Востока СССР. Владивосток : Изд-во ДВНЦ АН СССР, 1981. С. 41–50.
- Thuesen I., Oldenburg E., Iorgensen K. Microscope section analysis of pottery // Paléorient. 1989. Vol. 15, № 1. P. 273–278.
- Santacreu D.A. Identifying spathic calcite recipe in archaeological ceramics: possibilities and limitations // Cerâmica. 2014. Vol. 60. P. 379–391.
- Shepard A.O. Ceramics for the Archaeologist. Washington, D.C. : Carnegie Institute press, 1985. 414 p.
- Жущиховская И.С. Опыт применения электронной микроскопии в изучении археологической керамики юга Дальнего Востока // Записки Института истории материальной культуры. 2017. № 16. С. 75–91.
- Дегтярева А.Д. Методика поверхностного изучения цветного металла // Вестник археологии, антропологии и этнографии. 2006. № 6. С. 117–126.
- Мягкая И.Н., Сарыг-оол Б.Ю., Лазарева Е.А. Связь корреляций меди, цинка, селена, бария, ртути, серебра и золота в веществе потока рассеяния Урского хвостохранилища с его минеральным составом (Россия. Кемеровская область) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2016. № 2. С. 122–132.
- Mandal B., Datta P.K. Hot mold casting process of ancient East India and Bangladesh // China Foundry. 2010. Vol. 7, № 2. P. 171–177.
- Sahlen D. Ceramic Evidence from Non-ferrous Metallurgy in the Mälaren Valley during the Viking Age // Prehistoric Pottery Across the Baltic / ed. by P.E. Pettersen / BAR S2785. Oxford, 2016. P. 75–80.
- Freestone I.A., Middleton A.P., Meeks N.D. Significance of phosphate in ceramic bodies: discussion on paper by Bollong et al. // Journal of Archaeological Science. 1994. Vol. 21. P. 425–426.

Статья представлена научной редакцией «История» 26 мая 2021 г.

#### Ceramic Casting Molds from the Kruglaya Dolina Site in the Primorye Region: A Case of an Interdisciplinary Study

*Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta – Tomsk State University Journal*, 2021, 470, 135–146.

DOI: 10.17223/15617793/470/16

**Irina S. Zhushchikhovskaya**, Institute of History, Archaeology and Ethnology of the Peoples of the Far-East, Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation). E-mail: irinalzh@mail.ru

**Igor Yu. Buravlev**, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (Vladivostok, Russian Federation); Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russky Island, Russian Federation). E-mail: buravlev.i@gmail.com / buravlev\_igor@yahoo.com

**Keywords:** bronze-casting craft; period of Bohai state; natural sciences methods; technical ceramics.

The research was supported by the Russian Science Foundation, Project No. 20-18-00081.

The article presents an interdisciplinary study of casting molds as one of the kinds of old technical (“metalworking”) ceramics. The material of the study is ceramic molds (47 whole and fragmented samples) unearthed at the Kruglaya Dolina settlement in the central Primorye region. The molds and other objects of technical ceramics (crucibles, nozzle) were found in destroyed, non-stratified cultural deposits and connected with the remains of bronze-casting workshops complex which was dated supposedly to the Bohai state period, 698–926. The study aimed (1) to examine the morphological and technological characteristics of the molds, and (2) to detect traces of alloys at the working surfaces of the molds. The study employed methods of binocular microscopy and laboratory re-firing testing for (1), and scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS), portable X-Ray fluorescence spectroscopy (pXRF) for (2). The analyzed ceramic molds were intended for the casting of semi-spherical buttons, several kinds of pendants, rosette-shaped openwork ornaments. Original bronze items which could be cast in these molds were not found at Kruglaya Dolina. According to the data on the morphological variability of the molds together with the results of the examination of the ceramic pastes technology, one can suppose that the casting molds were produced by different craftsmen or different workshops. SEM-EDS and pXRF analyses detected the traces of bronze alloys at 15 mold samples with carbonized working surfaces. Chemical elements – metals – lead (Pb), tin (Sn), and copper (Cu) are traced in various combinations at various samples. In some cases together with metals arsenic (As) is detected. The interpretation of these results follows methodological recommendations based on the published data of experimental research. The presence of certain elements can be stated, and their relative concentrations in the spectrum composition can be evaluated. However, it is necessary to take into account that the amounts of certain elements in the spectrum do not correspond to their amounts in the original alloy composition. Therefore, qualitative characteristics of the alloys can be determined, but not quantitative ones. According to the results, the three-component alloys containing copper, tin, and lead are recognized certainly. The tin-copper non-lead alloy and the “pure copper” alloy are supposed in some cases. Previous investigations on the old bronzes chemical compositions in southern Russian Far East revealed that three-component alloys (lead-tin-copper) containing arsenic had been used widely during the Bohai state period. Tin-copper and “pure copper” alloys were known at that time as well. It seems to be likely that the casting molds from the Kruglaya Dolina site are dated to the Bohai state period. Further researches of this site’s bronze-casting workshops complex remains will focus on other categories of technical ceramics.

#### REFERENCES

1. Krenke, N.A. & Taylntseva, E.Yu. (2002) Liteynye formy s D'yakova gorodishcha [Foundry forms from the Dyakov settlement]. *Rossiyskaya arkheologiya*. 4. pp. 90–110.
2. Lopatina, O.A. (2002) Tekhnologicheskaya kharakteristika glinyanykh liteynykh form D'yakova gorodishcha [Technological characteristics of the clay casting molds of the Dyakov settlement]. *Rossiyskaya arkheologiya*. 4. pp. 111–112.
3. Durakov, I.A. & Kobeleva, L.S. (2017) The Technical Ceramics of Krotovo Culture (Central Baraba). *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Istoryya – Tomsk State University Journal of History*. 49. pp. 23–25. (In Russian). DOI: 10.17223/19988613/49/4
4. Kearns, T., Martinon-Torres, M. & Rehren, Th. (2010) Metal to mold: alloy identification in experimental casting molds using XRF. *Historical Metallurgy*. 44 (1). pp. 48–58.
5. Liu, S. et al. (2013) Microscopic study of Chinese bronze casting molds from the Eastern Zhou period. *Journal of Archaeological Science*. 40. pp. 2402–2414.
6. Zong, Y. et al. (2017) Structural and compositional analysis of a casting mild shard from ancient China. *PLoS ONE*. 12 (3). pp. 1–13.
7. Molodin, V.I. et al. (2019) Thermogravimetry in the Studies of Ancient Technical Ceramics. *Chemistry for Sustainable Development*. 27. pp. 101–108.
8. Kon'kova, L.V. (1989) *Bronzoliteynoe proizvodstvo na yuge Dal'nego Vostoka SSSR. Rubezh II–I tys. do n.e. – XIII vek n.e.* [Bronze casting in the south of the Far East of the USSR. The turn of the I millennium BCE – XIII century CE]. Leningrad: Nauka.
9. Len'kov, V.D., Semenichenko, L.E. & Khorev, V.A. (1974) Sledy metallurgicheskogo proizvodstva na rannesrednevekovom poselenii v doline r. Arsen'evka [Traces of metallurgical production at an early medieval settlement in the valley of the Arsenyevka River]. *Voprosy istorii i kul'tury narodov Dal'nego Vostoka*. 2. pp. 96–103.
10. Tatarnikov, V.A. (1981) Stoyanka Vodorazdel'naya – novyy pamyatnik Severo-Vostochnogo Primor'ya [Vodorazdelnaya site – a new monument of North-Eastern Primorye]. In: *Materialy po arkheologii Dal'nego Vostoka SSSR* [Materials on the archaeology of the Far East of the USSR]. Vladivostok: Far East Scientific Center of the Academy of Sciences of the USSR. pp. 41–50.
11. Thuesen, I., Oldenburg, E. & Iorgensen, K. (1989) Microscope section analysis of pottery. *Paléorient*. 15 (1). pp. 273–278.
12. Santacreu, D.A. (2014) Identifying spathic calcite recipe in archaeological ceramics: possibilities and limitations. *Cerámica*. 60. pp. 379–391.
13. Shepard, A.O. (1985) *Ceramics for the Archaeologist*. Washington, D.C.: Carnegie Institute Press.
14. Zhushchikhovskaya, I.S. (2017) Experience of Using Scanning Electron Microscopy in the Study of Archaeological Ceramics From the Southern Far East. *Zapiski Instituta istorii material'noy kul'tury*. 16. pp. 75–91. (In Russian).
15. Degtyareva, A.D. (2006) Metodika poverkhnostnogo izucheniya tsvetnogo metalla [Methods of non-ferrous metal surface study]. *Vestnik arkheologii, antropologii i etnografii*. 6. pp. 117–126.
16. Myagkaya, I.N., Saryg-ool, B.Yu. & Lazareva, E.A. (2016) Relationship of Copper, Zinc, Selenium, Barium, Mercury, Silver and Gold Correlations With Mineral Composition of a Material in Ursk Tailings Pit Desperation Train (Russia, Kemerovo Region). *Vestnik VGU. Seriya: Geologiya*. 2. pp. 122–132. (In Russian).
17. Mandal, B. & Datta, P.K. (2010) Hot mold casting process of ancient East India and Bangladesh. *China Foundry*. 7 (2). pp. 171–177.
18. Sahlen, D. (2016) Ceramic Evidence from Non-ferrous Metallurgy in the Mälaren Valley during the Viking Age. In: Pettersen, P.E. (ed.) *Prehistoric Pottery Across the Baltic*. BAR S2785. OxfordL BAR Publishing. pp. 75–80.
19. Freestone, I.A., Middleton, A.P. & Meeks, N.D. (1994) Significance of phosphate in ceramic bodies: discussion on paper by Bollong et al. *Journal of Archaeological Science*. 21. pp. 425–426.

Received: 26 May 2021