

**УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ
БРОНЗОВОГО ВЕКА ЮЖНОГО УРАЛА И КАЗАХСТАНА****М.Н. Анкушев, Д.А. Артемьев, И.А. Блинов***Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская обл., 456317 Россия; ankushev_maksim@mail.ru***FORMATION CONDITIONS OF THE
BRONZE AGE METALLURGICAL SLAGS OF THE SOUTH URALS AND KAZAKHSTAN****M.N. Ankushev, D.A. Artemyev, I.A. Blinov***South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy, Miass,
Chelyabinsk oblast, 456317 Russia; ankushev_maksim@mail.ru*

Среди большого разнообразия металлургических шлаков из памятников бронзового века Южного Урала и Казахстана авторами выделено четыре основных минералогических типа: оливиновый хромитсодержащий, оливиновый сульфидсодержащий, стекловатый сульфидсодержащий и пироксеновый. Типы шлаков значительно отличаются между собой по морфологии образцов, основным и второстепенным минералам, составу расплавных включений. Оценка температуры расплава и динамики ее изменений проведена на основе анализа фазовых диаграмм состояния и экспериментальных исследований. Исходя из онтогении новообразованных минералов, реликтовых включений и предполагаемых температур для всех типов шлаков предложены модели кристаллизации.

Илл. 15. Табл. 3. Библ. 46.

Ключевые слова: металлургический шлак, бронзовый век, температура расплава, модель кристаллизации, Южный Урал, Казахстан.

Four main mineralogical types are identified among a wide variety of metallurgical slags from the Bronze Age sites of the South Urals and Kazakhstan: chromite-bearing olivine, sulfide-bearing olivine, glassy sulfide-bearing and pyroxene. The slag types significantly differ in morphology, major and accessory minerals and composition of melt inclusions. The temperature of melt and the dynamics of its changes are estimated from phase diagrams and experimental studies. Crystallization models are proposed on the basis of ontogeny of newly formed minerals, relict inclusions, and possible temperatures for all slag types.

Figures 15. Tables 3. References 46.

Key words: metallurgical slags, Bronze Age, melt temperature, crystallization model, South Urals, Kazakhstan.

Введение

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных археометаллургии Урало-Казахстанского региона – крупного горно-металлургического центра бронзового века (Черников, 1960; Черных, 1970). Большая часть из них посвящена типологии, составу и технологии изготовления металлических изделий (Аванесова, 1991; Дегтярева, 2010). Более скромно освещены шлаки и другие продукты металлургического передела (Каргалы...,

2004; Григорьев, 2013; Зайков и др., 2013). В публикациях основное внимание уделяется задаче определения источников рудного сырья. Не менее важной задачей археометрии является их морфологическая и минералого-геохимическая типизация. Учитывая разрозненность находок и сильную неоднородность в местонахождениях древних шлаков, обобщение материалов по большой территории способно помочь в изучении горно-металлургических технологий и путей их распространения.

Получить информацию о технологиях металлургии бронзового века помогает установление температуры расплава и порядка кристаллизации минералов в шлаках. При этом в отечественной литературе известно не так много публикаций, где рассмотрены минералогия и условия образования древних шлаков. Наиболее цельной работой является монография С.А. Григорьева (2013), где на основе изучения свыше двух тысяч образцов древних шлаков и медных руд Северной Евразии автор приводит их минералогическую типизацию, рассматривает возможные источники медного сырья и легирующих примесей, делает выводы о технологии металлургии бронзового и раннего железного века. Однако некоторые минералогические группы, выделенные автором, как нам кажется, частично перекликаются между собой и могут принадлежать к одному типу.

В настоящей статье предложена оригинальная минералогическая типизация, основанная на главных и реликтовых минералах металлургических шлаков, которая отражает как источники вещества, так и применяемые технологии. Основной целью работы стало установление особенностей условий образования для выделенных типов шлаков из археологических памятников бронзового века Южного Урала и Казахстана. Технологические аспекты металлургии бронзового века рассматриваются, главным образом, на основе изучения фазовых диаграмм и последовательности минералообразования.

Материалы и методы

В работе использовано свыше 200 образцов металлургических шлаков. Минералогия шлаков и особенности состава различных минералов установлены методом оптической (Olympus BX 51) и электронной микроскопии (Tescan VEGA 3 sbu, ускоряющее напряжение 20 кВ, живое время 120 с, поглощенный ток на эталоне Co около 260 pA, аналитик И.А. Блинов).

Минералогические типы шлаков

На основе изучения реликтовых и новообразованных минералов металлургических шлаков бронзового века Южного Зауралья и Приуралья, а также Западного и Центрального Казахстана (рис. 1) выделено четыре минералогических типа: оливинный хромитсодержащий, оливинный сульфидсодержащий, стекловатый сульфидсодержащий и пироксеновый. Распространение этих типов на археологических памятниках приведено в таблице 1.

Оливинные хромитсодержащие шлаки представляют собой фрагменты шлаковых лепешек,

образующихся над слитком выплавленной меди (рис. 2а). Верхняя сторона лепешки неровная, на ней часто фиксируются отпечатки растительности и древесины. Нижняя часть (примыкающая к слитку металла) ровная, стекловидная, с большим количеством пор от выходящих газов. Шлаки этого типа имеют характерный бортик (или закраину), образующуюся при медленном стекании расплава. Самые крупные фрагменты этого типа имеют размер 5–7 см, но обычно встречаются обломки величиной 2–3 см. Цвет шлаков темно-бурый, темно-серый до черного. Пористость неравномерная (1–10 % от образца). Текстура микропорфировая.

Этот тип шлаков обнаружен на укрепленных поселениях синташтинской культуры (Сарым-Саклы) и на синташтинских горизонтах многослойных памятников бронзового века (Каменный Амбар, Устье I, Левобережное). На поселениях Левобережное и Устье I найдены практически целые лепешки шлака (Древнее..., 2013; Петров и др., 2018). В Приуралье такой тип зафиксирован на Турганикском поселении, содержащем материалы энеолита, ямного, абашевского и срубного времени, и руднике Кзылоба, относящемуся к срубной культуре. Шлаки сложены оливинном (60–80 %, здесь и далее приведена доля от общего объема образца), магнетитом (10–30 %), стеклом (10–20 %) и реликтивными хромшпинелидами (1 %, редко более). На Турганикском поселении в шлаках также встречаются пироксены (до 30 %). Единичны реликтовые находки обломков серпентинитов и кварца, а также микровключения сульфидов.

Оливин в шлаках образует идиоморфные призматические кристаллы часто с хорошо выраженной зональностью (рис. 3а, б, в) и скелетные кристаллы (рис. 3г, д, е). Минерал представлен фаялитом, однако центральные части кристаллов обогащены форстеритовым миналом, вплоть до соответствия железистому форстериту (Анкушев и др., 2018). В отраженном свете и на BSE снимках на периферии зерен видна более светлая кайма, характеризующаяся повышенным содержанием Fe по сравнению с центральными частями; иногда встречается ступенчатая и ритмичная зональность.

Магнетит образует идиоморфные индивиды размером 0.05–0.2 мм, скелетные кристаллы и мелкие симплектитовые вроски в оливине. Количество магнетита в образцах не более 10–20 %.

Стекло вмещает большое количество мелких цепочечных и перистых кристаллов оливина и магнетита. Оно содержит больше Si и Ca и меньше Fe, чем оливин, а также Al, Na и K. Состав стекла ко-

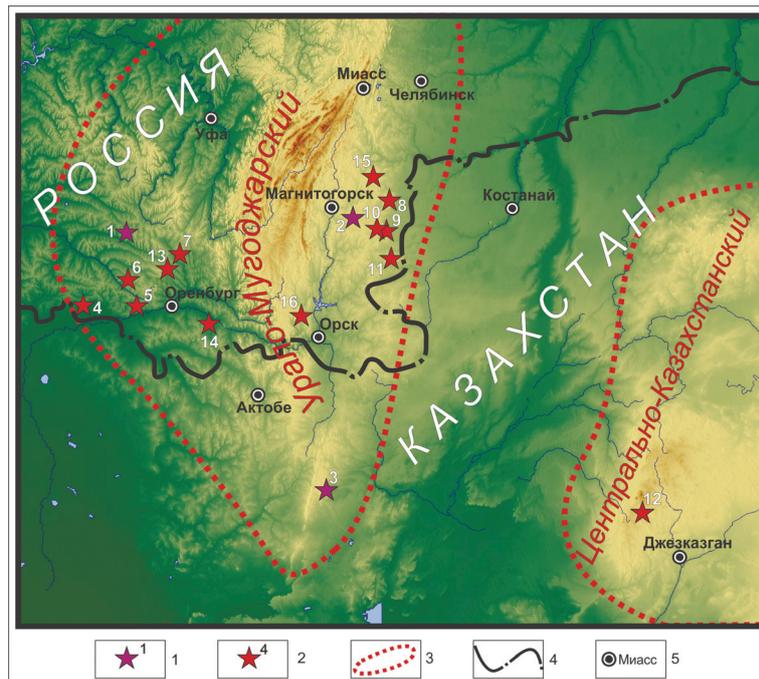


Рис. 1. Схема расположения археологических памятников с изученными шлаками.

1 – археологические микрорайоны; 2 – археологические поселения и рудники; 3 – горно-металлургические центры бронзового века; 4 – современная граница Российской Федерации и Республики Казахстан; 5 – современные города.

Археологические памятники: 1 – Ивановский микрорайон (поселения Ивановка, Токское, Турганик); 2 – Зингейский микрорайон (поселения Сарым-Саклы, Кацбах I, Кацбах VI, рудник Воровская яма); 3 – Сарлыбайский микрорайон (поселение Сарлыбай III, рудник Сарлыбай); 4–12 – поселения: 4 – Кузьминковское II, 5 – Родниковое, 6 – Покровское, 7 – Булановское II, 8 – Устье I, 9 – Каменный Амбар, 10 – Коноплянка, 11 – Левобережное, 12 – Талдысай; 13–16 – рудники: 13 – Ордынский овраг, 14 – Кзылоба, 15 – Новотемирский, 16 – Ишкининский.

Fig. 1. Scheme of archaeological sites with studied slags:

1 – archaeological microregions; 2 – archaeological settlements and mines; 3 – Bronze Age mining and metallurgical centers; 4 – current boundary of Russian Federation and Republic of Kazakhstan; 5 – present-day towns.

Archaeological sites: 1 – Ivanovka microregion (settlements of Ivanovka, Tokskoe, Turganik); 2 – Zingeyka microregion (settlements of Sarym-Sakly, Katzbakh I, Katzbakh VI; Vorovskaya Yama mine); 3 – Sarlybay microregion (settlement of Sarlybay III; Sarlybay mine); 4–12 – settlements: 4 – Kuzminkovskoe II, 5 – Rodnikovoe, 6 – Pokrovskoe, 7 – Bulanovskoe II, 8 – Ust'e I, 9 – Kamenny Ambar, 10 – Konoplyanka, 11 – Levoberezhnoe, 12 – Taldysai; 13–16 – mines: 13 – Orda Ovrage, 14 – Kzyloba, 15 – Novy Temir, 16 – Ishkinino.

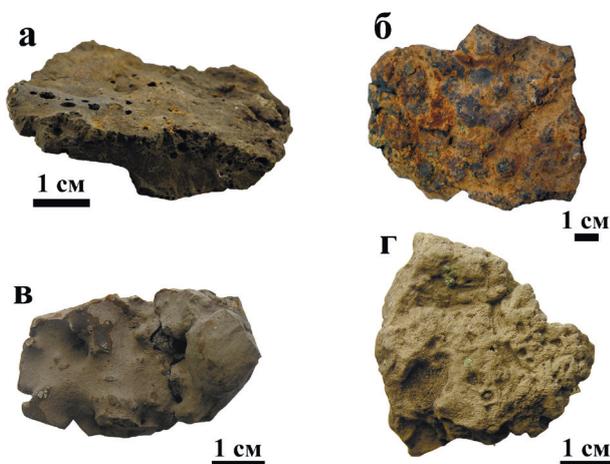


Рис. 2. Фрагменты оливиновых хромитсодержащих (а), оливиновых сульфидсодержащих (б), стекловатых сульфидсодержащих шлаков (в) и пироксеновых (г) шлаков бронзового века.

Fig. 2. Fragments of Bronze Age chromite-bearing olivine (a), sulfide-bearing olivine (b), sulfide-bearing glassy (v) and pyroxene (r) slags.

леблется в шлаках из разных поселений и в разных образцах, в частности, по содержаниям Si, Al, Fe и Ca (табл. 2). В целом, состав стекла хромитсодержащих образцов соответствует основным, редко ультраосновным и средним породам, петрохимический ряд нормальный, редко умеренно щелочной (рис. 4).

Реликтовые минеральные включения представлены хромшпинелидами размером 0.1–0.5 мм,

Таблица 1
 Archaeological sites of the South Urals and Kazakhstan and metallurgical slag types
 Археологические памятники бронзового века Южного Урала и Казахстана и типы металлургических шлаков

Археологический памятник	Культурно-исторический период и абсолютный возраст памятника	Тип шлака
Каменный Амбар	Синташтинско-петровский (2030–1870 гг. до н.э.) (Корякова и др., 2011; Erimakhov, Krause, 2013)	Ol-Chr
Сарым-Саклы	Срубно-алакульский (1980–1780 гг. до н.э.) (Корякова и др., 2011; Erimakhov, Krause, 2013)	Ol-Sulf
Левобережное	Синташтинский (Зданович, Батанина, 2007)	Ol-Chr
Устье I	Синташтинский (1930–1770 гг. до н.э.), финал (Петров и др., 2018)	Ol-Chr
Коноплянка	Синташтинский, петровский (2030–1740 гг. до н.э.) (Древнее Устье..., 2013)	Ol-Chr
Кацбах I	Петровский, срубно-алакульский (1920–1745 гг. до н.э.) (Шарапова и др., 2014)	Ol-Sulf
Кацбах VI	Срубно-алакульский, финал (Анкушев и др., 2016)	Px
Рудник Воровская яма	Срубно-алакульский (Анкушев и др., 2016)	Gl-Sulf
	Срубно-алакульский (Зайков и др., 2005)	Px
	<i>Приуральский горно-металлургический центр</i>	
Турганинское	Ямный (3940–3480 гг. до н.э.), абашевский, срубный (Моргунова и др., 2017)	Ol-Chr
Родниковое	Абашевский, срубно-алакульский, финал (Кушцова, Файзуллин, 2012)	Gl-Sulf, Px
Ивановское	Срубный (Моргунова, Порохова, 1989)	Gl-Sulf
Токское	Срубный (Моргунова, Порохова, 1989)	Gl-Sulf
Покровское	Срубный (Порохова, 1989)	Gl-Sulf
Булановское II	Абашевский, синташтинский, срубно-алакульский, финал (Моргунова, Халяпин, 2003)	Gl-Sulf
Кузьминковское II	Срубно-алакульский (Моргунова и др., 2001)	Gl-Sulf
Рудник Ордьинский овраг	Срубно-алакульский (Богданов и др., 2018)	Gl-Sulf
Рудник Кзылоба	Срубно-алакульский (Богданов и др., 2018)	Gl-Sulf
	<i>Западный и Центральный Казахстан</i>	
Сарлыбай III	Срубно-алакульский (Ткачев и др., 2013)	Gl-Sulf
Талдысай	Петровский, алакульский, финал (Ермолаева и др., 2020)	Gl-Sulf, Ol-Sulf

Примечание. Минералогические типы шлаков: Ol-Chr – оловянистый хромитсодержащий, Ol-Sulf – оловянистый сульфидсодержащий, Gl-Sulf – стекловатый сульфидсодержащий, Px – пироксеновый.

Note. Mineralogical types of slags: Ol-Chr – chromite-bearing olivine, Ol-Sulf – sulfide-bearing olivine, Gl-Sulf – sulfide-bearing glassy, Px – pyroxene.

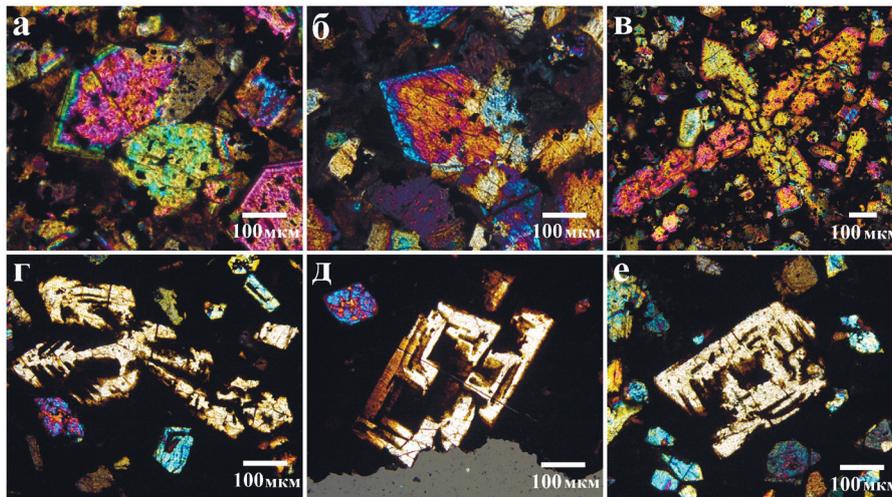


Рис. 3. Морфология кристаллов оливина в хромитсодержащем металлургическом шлаке:

а, б – зональные призматические кристаллы, поселение Устье I, обр. 161у-10864; в – сросток зональных удлиненных кристаллов, поселение Устье I, обр. 161у-10864; г, д, е – скелетные кристаллы, поселение Каменный Амбар, обр. 718/4027. Шлиф, с анализатором.

Fig. 3. Morphology of olivine crystals in metallurgical chromite-bearing olivine slag:

а, б – zoned prismatic crystals, settlement of Ust'e I, sample 161у-10864; в – intergrowth of zoned elongated crystals, settlement of Ust'e I, sample 161у-10864; г, д, е – skeletal crystals, settlement of Kamenny Ambar, sample 718/4027. Thin section with analyzer.

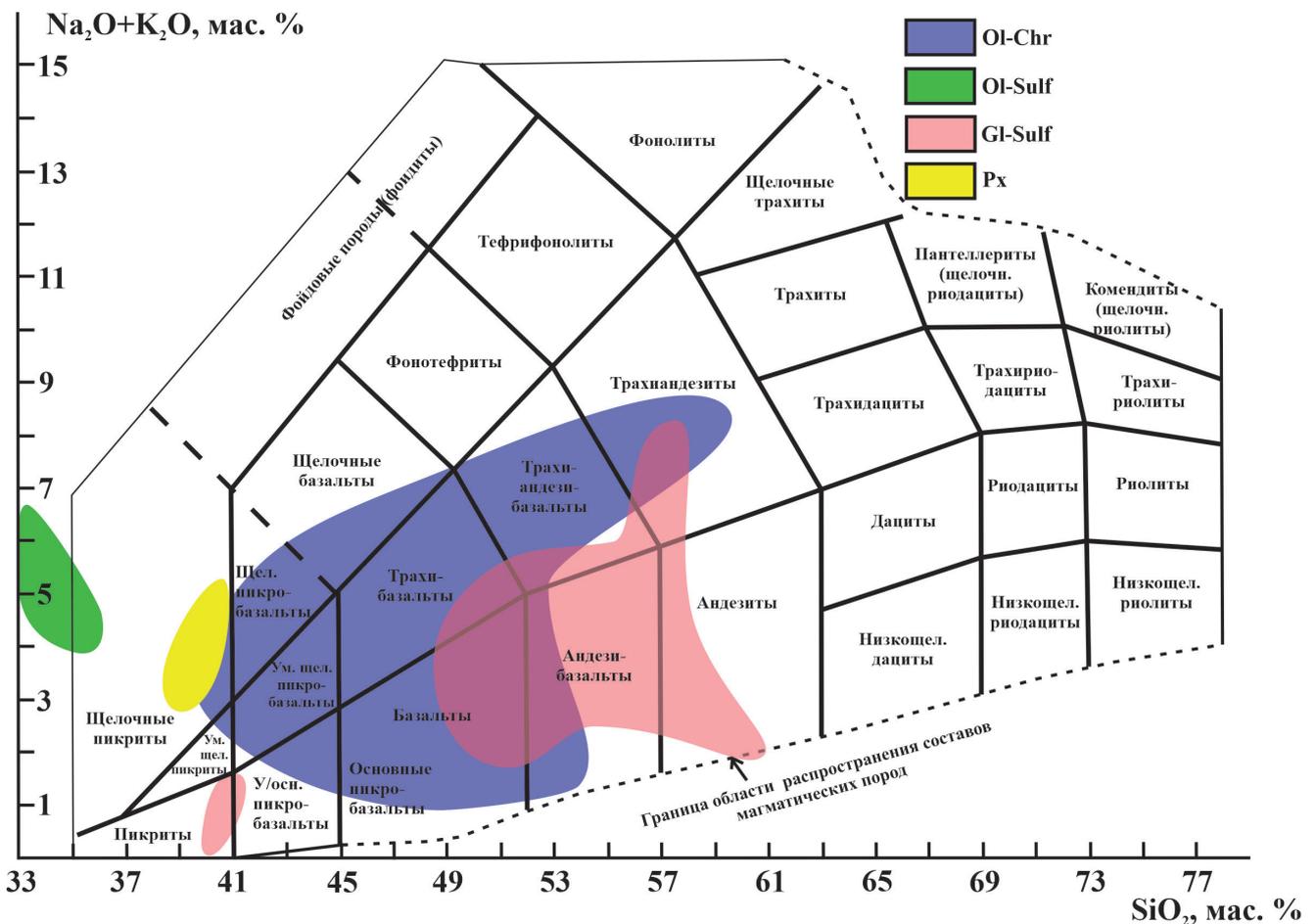


Рис. 4. Поля состава стекла различных типов металлургических шлаков бронзового века на TAS диаграмме.

Fig. 4. Composition of glass from various Bronze Age metallurgical slags on TAS diagram.

Таблица 2
Table 2

Средний состав стекла в металлургических шлаках поселений бронзового века на Южном Урале (мас. %)

Average composition of glass in metallurgical slags of the Bronze Age settlements of the South Urals (wt. %)

№ п/п	Объект и тип шлака	№ обр.	N	SiO ₂	FeO	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	CuO	Cu ₂ O	SO ₃	MnO	Cl	BaO	
1	Турганинское (OI-Chr)	П25-3ш-1	4	48.0	33.55	2.22	10.47	2.31	0.28	1.07	0.18	0.96	0.72	—	—	—	—	—	
2		П25-6ш	3	47.41	22.47	5.73	17.92	0.19	1.4	—	0.42	2.08	—	—	—	—	—	0.15	
3		3110/718	3	44.70	27.29	10.78	14.02	—	0.78	1.98	1.98	0.13	0.62	—	—	—	—	—	—
4	Каменный Амбар (OI-Chr)	3260д/718	3	50.82	34.02	7.10	5.25	—	0.47	1.10	0.18	0.65	0.35	—	—	—	—	—	—
5		342-2	5	34.59	36.15	7.94	9.75	0.12	1.47	3.40	—	5.63	0.28	—	0.18	0.27	—	—	0.22
6	Устье (OI-Chr)	161у-1677	3	50.36	22.06	14.86	7.02	0.82	0.51	2.42	0.74	0.98	—	—	0.07	—	—	—	—
7		161у-9187	1	50.84	21.02	14.03	5.62	0.82	0.34	4.84	0.25	1.23	—	—	—	—	—	—	—
8		161у-10472	2	55.59	15.28	17.10	2.69	0.91	0.33	6.90	0.62	0.41	—	—	—	0.07	—	—	—
9		161у-10656	3	48.11	22.14	13.46	8.34	1.87	0.14	3.27	0.37	1.78	0.14	—	—	0.31	—	—	—
10		161у-10864	2	42.81	24.73	10.16	15.07	0.29	1.14	3.45	0.21	1.60	0.29	—	—	0.37	—	—	—
11		w641-10-23	3	49.99	19.74	13.46	10.85	0.40	0.78	1.24	0.63	0.27	—	0.43	—	—	—	—	—
12		w641-30-55	3	44.63	21.94	13.94	13.24	—	1.33	2.09	0.94	0.68	—	—	0.74	—	—	—	—
13		w641-30-85	4	51.25	24.75	7.87	11.25	1.53	0.52	1.27	0.43	0.45	—	—	0.55	—	—	—	—
14		sin II 264	4	41.01	29.37	13.86	10.94	—	0.43	2.20	0.76	0.95	0.11	—	0.07	—	—	—	—
15		sin II 529	3	48.47	21.14	17.63	6.19	0.54	0.54	0.45	3.25	0.54	0.53	0.16	—	0.45	—	—	—
16	sin II 709	3	43.1	24.8	14.55	12.10	0.06	0.44	0.44	2.16	0.78	0.99	0.38	—	0.32	—	—	0.10	
17	Кацбах I (Px)	w937-20-1s	1	49.43	25.76	2.07	17.59	2.07	0.26	0.59	—	0.37	—	—	—	1.37	—	—	
18	Воровская яма (Px)	ВЯ 100-3	2	55.08	3.20	21.00	1.11	0.23	0.66	17.99	0.10	—	—	—	—	—	—	—	
19	Родниковое (Gl-Sulf)*	П-87-1ш	4	39.69	32.13	4.06	5.59	0.49	1.30	2.56	—	0.53	—	—	—	—	0.04	12.65	
20		П-89 ш-1	3	54.22	11.75	8.04	12.56	1.92	2.15	2.75	0.67	0.28	1.80	—	—	—	0.18	3.62	
21		П-89-6ш	4	52.18	7.55	9.08	10.67	1.61	2.01	2.90	0.43	—	9.50	—	0.23	—	0.03	4.00	
22	Ордынский овраг (Gl-Sulf)	П-22-1ш	3	57.35	9.17	8.44	9.75	1.53	1.58	1.25	0.39	0.07	0.28	0.40	—	—	—	0.89	8.89
23		П-22-2ш	3	54.11	10.6	8.96	7.59	2.33	2.10	1.36	0.83	0.82	0.66	—	0.12	—	—	0.23	10.38
24	Кзылбаба (OI-Chr)	П-81ш	3	51.61	17.88	13.70	7.82	2.28	2.06	3.25	0.70	0.81	—	—	—	0.28	—	—	

Примечание. Здесь и в табл. 3, прочерк – не обнаружено; N – количество анализов. Суммы анализов в пределах 99–101 %. В составе также присутствует: * – 0.56 мас. % SrO (среднее).

Note. Here and in Table 3, dash - not detected; N – the number of analyses. The total of the analyses in the range of 99–101 %. * – 0.56 wt. % SrO (on average).

Таблица 3

Состав реликтов серпентина в шлаках (мас. %)

Table 3

Composition of serpentinite relics in slags (wt. %)

№	Образец, поселение	Анализ	SiO ₂	MgO	FeO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	NiO	CaO	Сумма
1	w641-30-85, Сарым-Саклы	16129I	48.25	44.91	4.48	—	—	—	—	—	97.64
2	161у-10864, Устье	16105J	50.72	46.08	2.22	0.46	0.20	—	0.32	—	100*

Примечание. * – нормировано на 100 %.

Note. * – normalized to 100 %.

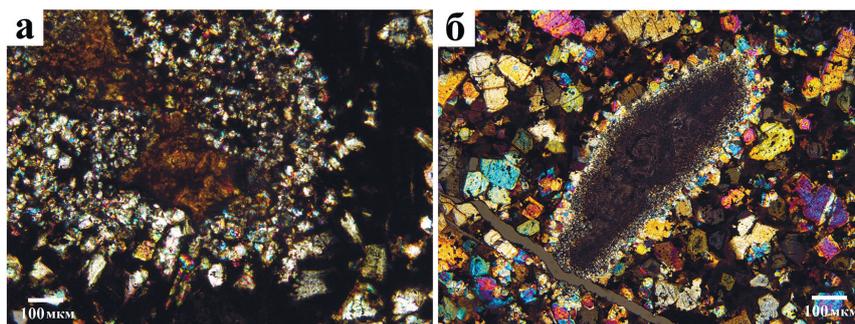
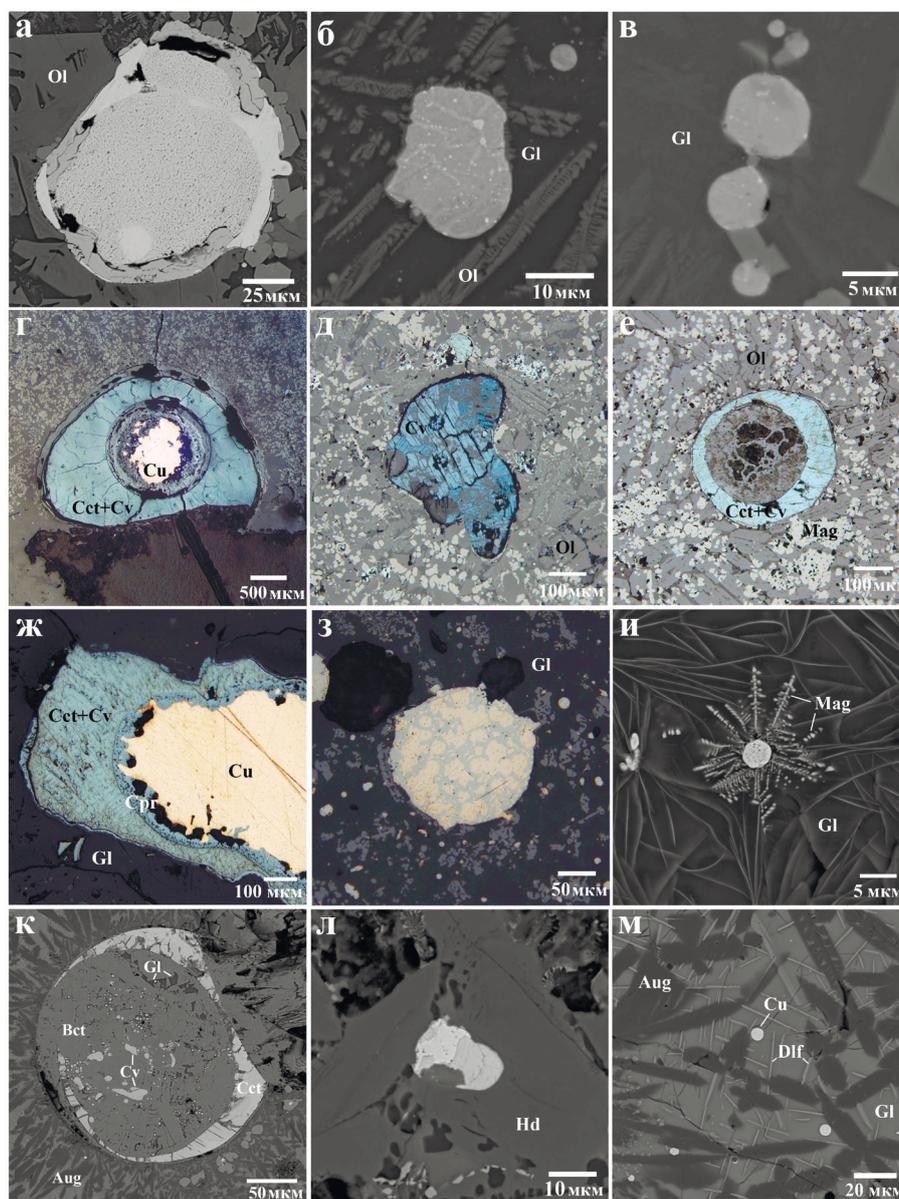


Рис. 5. Реликты серпентина с каймой новообразованного оливина в хромитсодержащем металлургическом шлаке: а – поселение Каменный Амбар, образец 718-3155; б – поселение Устье I, образец – 161y-10864. Шлиф, с анализатором.

Fig. 5. Serpentine relics with a rim of newly formed olivine in metallurgical chromite-bearing olivine slag:

а – settlement of Kamenny Ambar, sample 718-3155; б – settlement of Ust'e I, sample 161y-10864. Thin section with analyzer.



которые встречаются как в виде идиоморфных, так и гипидиоморфных кристаллов с изъеденными границами. Зачастую наблюдаются пористые или частично разрушенные зерна. По периферии обычно развивается тонкая (3–5 мкм) сплошная или прерывистая хроммагнетитовая кайма. По составу реликты соответствуют хромиту, редко магнезиохромиту (Зайков и др., 2013).

Среди реликтов вмещающих пород в хромитсодержащих шлаках встречаются обломки серпентинизированных ультрабазитов (рис. 5) и немногочисленные обломки кварца размером от 0.1 мм до 2 мм. Класты серпентинитов имеют оплавленные границы, по их периферии развиты мелкие кристаллы оливина. Серпентинит часто ожелезнен, иногда в обломках фиксируются зерна хромшпинелидов (Чухарева, 2009). Состав реликтов, в целом, соответствует серпентину (табл. 3). Повышенные содержания SiO_2 и MgO могут объясняться снижением содержания воды в серпентине под воздействием высоких температур.

Расплавные включения представлены одно- и многофазными агрегатами меди, мышьяковых бронз, сульфидов и арсенидов. Включения обычно находятся в стекле, в редких случаях мелкие включения оказываются захваченными кристаллами новообразованного оливина. Их форма округлая, изометричная, вытянутая, амёбовидная, размер – от

1–2 мкм до 3–5 мм (рис. 6а–в). Состав металлических, сульфидных и арсенидных расплавных включений в хромитсодержащих шлаках разнообразен и отличается не только в разных поселениях, но и в образцах из одного объекта и даже в одном образце (Ankushev et al., 2020).

Оливиновые сульфидсодержащие шлаки представлены лепешковидными и комковатыми фрагментами, по ним редко можно установить верхнюю и нижнюю часть образца при плавке (рис. 1б). На поверхности часто фиксируются окисленные корольки меди и сульфидов, сложенные вторичными минералами меди. Фрагменты этого типа обычно имеют размер 2–4 см. Цвет шлаков черный, темно-бурый. Пористость неравномерная (1–10 % от образца). Текстура микропорфировая. Этот тип встречен на срубно-алакульском горизонте поселения Каменный Амбар и на многослойном поселении Коноплянка. Минеральный состав образцов представлен оливином (40–60 %), магнетитом (20–30 %), вюститом (15–30 %), стеклом (5–10 %), сульфидами (<1 %).

Кристаллы оливина размером 0.1–0.3 мм имеют удлинённо-призматическую, скелетную форму, образуют цепочки. Состав оливина соответствует фаялиту с небольшими примесями Mg, Ca, Mn (Ankushev et al., 2020). Зональность кристаллов наблюдается, но проявлена обычно значительно

Рис. 6. Расплавные включения в металлургических шлаках бронзового века Южного Урала и Казахстана:

а–в – оливиновые хромитсодержащие шлаки: а – двухфазное Cu-As срастание, б – трехфазное включение с матрицей, ламелями и каплями с разным соотношением Cu-Fe-S-As-Ni, в – Cu-Fe-S включения в стекле шлака; г–е – оливиновые сульфидсодержащие шлаки: г – халькозин-ковеллиновая «рубашка» вокруг королька меди, д – частично оплавленный реликт ковеллиновой руды, е – новообразованное халькозин-ковеллиновое срастание; ж–и – стекловатые сульфидсодержащие шлаки: ж – халькозин-ковеллиновая «рубашка» вокруг королька меди, з – включение двухфазной мышьяковой бронзы, и – скелетные кристаллы магнетита вокруг королька меди; к–л – пироксеновые шлаки: к – халькозиновое обрамление, л – двухфазная медно-сульфидная капля, м – мелкие капли меди. Поселения: Устье I (а–в), Левобережное (б), Сарым-Саклы (в), Каменный Амбар (г), Коноплянка (д, е), Родниковое (ж, и, к, м), Талдысай (з). Рудник Воровская яма (л).

Здесь и далее: Ol – оливин, Hd – геденбергит, Aug – авгит, Mag – магнетит, Dlf – делафоссит, Cct – халькозин, Cv – ковеллин, Cpr – куприт, Bct – брошантит, Gl – стекло, Cu – медь.

Fig. 6. Melt inclusions in the Bronze Age metallurgical slag of the South Urals and Kazakhstan:

а–в – chromite-bearing olivine slags (settlements): а – two-phase Cu-As intergrowth, б – three-phase inclusion with matrix, lamellas and droplets with different Cu-Fe-S-As-Ni ratios, в – Cu-Fe-S inclusions in slag glass; г–е – sulfide-bearing olivine slags: г – chalcocite-covellite rim around Cu regulus, д – partly melted relict of covellite ore, е – newly formed chalcocite-covellite intergrowth; ж–и – sulfide-bearing glassy slags: ж – chalcocite-covellite rim around Cu regulus, з – inclusion of two-phase arsenic bronze, и – skeletal magnetite crystals around Cu regulus; к–л – pyroxene slags: к – chalcocite «crescent», л – two-phase copper-sulfide droplet; м – small Cr droplets. Settlements: Ust'e I (а–в), Levoberezhnoe (б), Sarym-Sakly (в), Kamenny Ambar (г), Konoplyanka (д, е), Rodnikovoe (ж, и, к, м), Taldysay (з). Vorovskaya Yama mine (л).

Hereinafter, Ol – olivine, Hd – hedenbergite, Aug – augite, Mag – magnetite, Dlf – delafossite, Cct – chalcocite, Cv – covellite, Cpr – cuprite, Bct – brochantite, Gl – glass, Cu – copper.

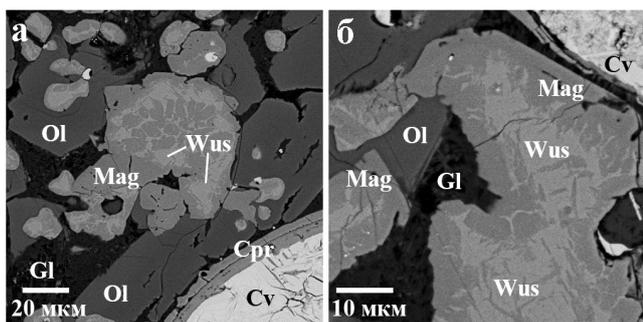


Рис. 7. Срастания магнетита и вюститита в оливинном сульфидсодержащем шлаке.

Поселение Каменный Амбар, обр. 718/2627. Фото в отраженных электронах. Wus – вюстит.

Fig. 7. Intergrowths of magnetite and wüstite in sulfide-bearing olivine slag.

Settlement of Kamenny Ambar, sample 718/2627. BSE image. Wus – wüstite.

слабее, чем в призматических кристаллах хромитсодержащего типа. Удлиненные кристаллы фаялита могут срастаться между собой, образуя паркетовидные текстуры. Подобная морфология кристаллов свидетельствует о более быстром процессе кристаллизации, чем у хромитсодержащей разновидности.

Образцы содержат большое количество новообразованного магнетита (19–28 %) и вюститита (15–27 %) (Анкушев, 2019). На BSE фото эти минералы образуют сложные срастания каплевидной и амебовидной формы размером 0.1–0.2 мм (рис. 7). Как правило, периферическая зона таких сростков представлена магнетитом, что свидетельствует о росте степени окисленности расплава по мере падения температуры.

Стекло присутствует в интерстициях оливина и оксидов железа. По составу стекло низкокремнистое и высокожелезистое нормального ряда (рис. 4). Стекла хромитсодержащих образцов содержат больше SiO_2 и Al_2O_3 , в стекле сульфидсодержащих шлаков содержится больше FeO и P_2O_5 . Эти значения полностью согласуются с валовым составом образцов и их минералогическими особенностями.

В оливинном сульфидсодержащем типе реликтовые включения представлены обломками медных сульфидных руд. Обломки имеют разнообразную форму, их размер достигает 1 мм. Морфология включений позволяет отличать реликтовые нерасплавленные (или частично оплавленные) обломки сульфидов, сохранившие первичные текстуры руд и новообразованные сульфиды, которые часто фиксируются вокруг капель меди. Сульфиды

меди характеризуются варьирующими соотношениями $\text{Cu} : \text{S}$, соответствующими минералам ряда халькозина-ковеллина, и примесями Fe, Co, Ni, As, Se, Te, Sb, Ag, Pb и Bi (Artemyev, Ankushev, 2019). В образцах этого типа встречаются также многофазные срастания меди, сульфидов, различных бронз, медистого золота (рис. 6г–е) (Зайков и др., 2013).

Стекловатые сульфидсодержащие шлаки имеют комковатую форму и размер фрагментов до 7–10 см, в них широко распространены поры и пустоты. Цвет шлаков черный, темно-бурый, темно-серый (рис. 2в). Поверхность матовая стекловидная, пористость средняя, структура микропорфировая. Этот тип широко распространен на многослойных археологических памятниках Приуралья: поселениях Родниковом, Ивановском, Токском, Покровском, Кузьминковском II, Булановском II и руднике Ордынский овраг. В Зауралье этот тип отмечен на срубно-алакульском поселении Кацбах VI и руднике Воровская яма. Образцы зафиксированы также на памятниках Центрального Казахстана: Сарлыбай III и Талдысай. Шлаки этой группы состоят из стекла (50–80 %), реликтового кварца (20–40 %), реликтового плагиоклаза (1–5 %), сульфидов (1–5 %), единичных зерен барита и апатита.

Основным компонентом является стекло. В соответствии с диаграммой TAS состав стекла средний, петрохимический ряд нормальный. Состав стекла шлаков зауральского поселения Кацбах VI концентрируется в области пикритов, приуральские объекты образуют большое поле значений в области базальтов-андезитов (рис. 3). В матрице стекла находится большое количество зерен кварца размером до 0.2 мм, часто трещиноватых. По трещинам иногда развиты вторичные минералы меди, также иногда в них встречаются включения апатита. В стекловатых шлаках установлены большое количество обломков барита, частично оплавленные реликты плагиоклаза, вокруг которых фиксируются ореолы нестехиометричных мозговидных новообразований барий-алюмосиликатного состава. В редких случаях в стекле образуются скелетные кристаллы волластонита.

Расплавные включения представлены каплями металлической меди размером до 3 мм и сульфидов размером до 0.1 мм (см. рис. 6ж–и). Иногда встречаются также сульфидные обломки размером до 50 мкм. Медь образует внутреннюю часть корольков, окруженную сульфидной «рубашкой», в которой встречаются субмикронные включения серебра. Также в крупных корольках меди выявлены

мелкие включения сульфидов размером до 5 мкм. Характерным для приуральских памятников является присутствие в медной матрице субмикронных металлических включений фаз свинца и серебра.

Пироксеновые шлаки встречаются реже других, они имеют комковатую форму и размер фрагментов до 2–3 см (рис. 2г). Цвет образцов черный, темно-бурый, темно-серый. Поверхность матовая стекловидная, пористость низкая и средняя, структура микропорфировая. Этот тип зафиксирован на поселении Кацбах I и руднике Воровская яма, которые относятся к алакульскому времени. В Приуралье они обнаружены на Родниковом поселении срубного времени (Анкушев и др., 2019). Ранее аналогичные шлаки были описаны на поселении срубного времени Горный I (Каргалы, 2004). Этот тип сложен преимущественно пироксенами и/или волластонитом (50–80 %), стеклом (20–40 %), магнетитом (5–10 %).

Основную массу составляют минералы группы пироксенов и пироксеноидов: авгит, пижонит, геденбергит, волластонит, Fe-волластонит. Пироксены образуют перистые, скелетные и цепочечные кристаллы. Иногда на поверхности образца фиксируется корочка закалки, представленная отдельными срастаниями перистых кристаллов пироксена размером до 0.2 мм. Волластонит (иногда с примесью железа) представлен удлиненными призматическими ящичными кристаллами размером до 0.2 мм, зачастую образующими радиально-лучистые сростки. В шлаках этого типа присутствует небольшое количество магнетита и расплавные включения меди и сульфидов. Матрицей является стекло, состав которого может сильно варьировать (Ankushev et al., 2020). Реликтовые минералы установлены только в образцах рудника Воровская яма, где они представлены редкими цинксодержащими хромшпинелидами и обломками кварца (Анкушев и др., 2018). Расплавные включения представлены корольками меди (иногда с примесями мышьяка, свинца) и сульфидов (рис. 6 к–м).

Оценка температуры расплава и динамики ее изменений

Для установления температуры и особенностей кристаллизации проведены эксперименты по плавлению шлаков в муфельной печи с силитовыми нагревателями в воздушной среде. По экспериментальным данным температура плавления оливиновых хромитсодержащих и оливиновых сульфидсодержащих шлаков оказалась сходной и составила

1250–1285 °С (Анкушев и др., 2013). При остывании на открытом воздухе образец интенсивно растрескивался на фрагменты размером 0.1–1.0 см. При медленном остывании расплава в печи в тигле образовывалась плотная масса. Учитывая, что найденные образцы на поселениях бронзового века достигают 10 см и более, можно предположить, что древние металлурги также оставляли шлак в печи до полного остывания. На это также указывает хорошая раскristализация оливина и пироксенов.

Однако, получая расплав, мы лишь примерно можем оценить температурные интервалы, так как работа проводится со шлаком, а не протолитом, состоящем из рудного концентрата и флюсов. К тому же, большая часть меди и, возможно, других металлов в ходе металлургического процесса осаждается в виде слитков. Летучие компоненты, такие как сера, мышьяк и многие другие возгоняются. Также в металлургический шлак могут не переходить многие легкоплавкие компоненты флюсов и рудовмещающих пород, образуя текучие, побочные продукты металлургии (пористые разности), которые могут сплавляться с обмазкой печей. Костные флюсы, применявшиеся в бронзовом веке (Григорьев, 2013; Анкушев и др., 2018), при высоких температурах также будут выгорать. Таким образом, эксперименты по плавлению не могут полностью соответствовать древнему процессу плавки, а температура плавления может отличаться.

Оценить температуру начального расплава оливиновых шлаков, а также динамику их остывания можно с помощью фазовых диаграмм состояния. Эта работа была проведена для образцов наиболее изученного поселения Каменный Амбар. Исходя из минералого-геохимических данных, полученные результаты можно аппроксимировать и на другие объекты. На диаграмме MgO-SiO₂-FeO (Bowen, Shairer, 1935) валовый состав оливиновых хромитсодержащих шлаков попадает в высокотемпературную область 1300–1500 °С (рис. 8), что объясняется высоким количеством стекла, и, соответственно, повышенным содержанием SiO₂. Однако использованная диаграмма относится к системам, не включающим щелочные и щелочноземельные металлы, понижающие температуру плавления силикатных систем.

Состав оливинового сульфидсодержащего типа с меньшим количеством кремнезема попадает в область 1200–1300 °С, что лучше согласуется с нашими экспериментальными данными. Повышенные содержания SiO₂ в шлаках увеличивают температуру плавления до поля тридимита – 1400–

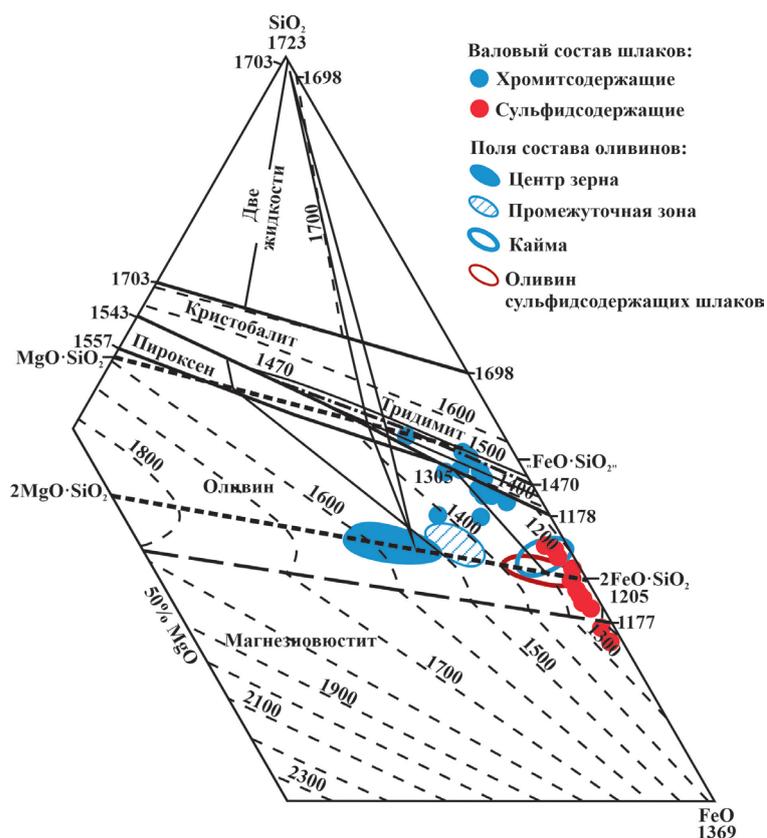


Рис. 8. Фазовая диаграмма $\text{MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ (Bowen, Shairer, 1935) с точками состава шлаков и оливина поселения Каменный Амбар.

Здесь и на рис. 11 цифры на изотермах означают градусы Цельсия.

Fig. 8. $\text{MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ phase diagram (Bowen, Shairer, 1935) with composition of slag and olivine from settlement of Kamenny Ambar.

Here and in Fig. 11, the numbers on isotherms indicate degrees of Celsius.

1500 °C, хотя в реальных системах она была ниже. Это связано с присутствием в стекле большого количества примесей, понижающих температуру, таких как CO_3^{2-} , Na_2O , K_2O , P_2O_5 и других. По отдельности содержания этих компонентов весьма малы, поэтому на диаграммах они слабо сдвигают точки состава, но суммарно могут значительно снижать температуру плавления.

Состав ядер кристалла оливина соответствует высокотемпературной области 1650–1500 °C, промежуточной зоны – 1500–1400 °C, каймы – 1350–1200 °C, цепочечных и скелетных оливинов сульфидсодержащих шлаков – 1400–1200 °C. Как и в случае с валовыми составами, температуры здесь могут быть завышены вследствие того, что мы рассматриваем лишь систему из трех компонентов $\text{MgO-SiO}_2\text{-FeO}$ без оксидов щелочных металлов, снижающих температуру плавления.

Разница химического состава зон оливина напрямую зависит от магнезиальности/железистости исходного расплава, а мощность, контрастность

и ритмичность зон – от температурного режима металлургического процесса. На бинарной фазовой диаграмме (Bowen, Shairer, 1932) состав центральной части наиболее магнезиальных кристаллов оливина соответствует температуре кристаллизации из расплава с температурой 1380–1520 °C (рис. 9), промежуточной зоны – 1290–1350 °C, периферической существенно фаялитовой каймы – 1200–1270 °C, что в целом, учитывая наличие флюсов, согласуется с данными эксперимента, а также температурами 1380–1290 °C, полученными для средневековых металлургических шлаков медного производства Западных Альп (Tuimati et al., 2005). Несколько более низкие температуры плавления (около 1200 °C) получены для образцов средневековых медных шлаков на юго-западе Польши (Kierczak, Pietranik, 2011) и позднего бронзового века Италии (Addis et al., 2016). В шлаках при производстве свинца и серебра в средневековой Чехии зафиксированы температуры 800–1200 °C (Ettler et al., 2009).

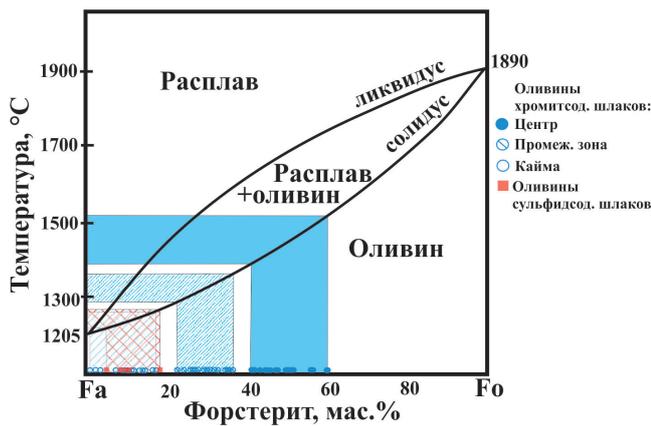


Рис. 9. Состав оливина древних металлургических шлаков на диаграмме плавкости в системе форстерит-фаялит при давлении 1 атм (Bowen, Shairer, 1932).

Fig. 9. Composition of olivine of ancient metallurgical slags on diagram of melting of the forsterite-fayalite system at 1 atm (Bowen, Shairer, 1932).

Таким образом, оценка температуры кристаллизации шлаков хромитсодержащего оливинового типа при помощи фазовых диаграмм дает максимальный верхний предел около 1600 °С, оцененный по составу наиболее магнезиальных оливинов. Факт достижения столь высоких температур в древности подтвержден успешными экспериментальными реконструкциями с достижением температур 1200–1300 и даже 1400–1600 °С (Caneva, Giardino, 1994; Woelk et al., 1998; Григорьев, 2013).

Скорость остывания расплава оливиновых шлаков рассмотрена на примере базальтовых расплавов (Donaldson, 1976). Этим автором установлено, что близкие к изометричным зональные кристаллы могут формироваться при скорости остывания медленнее, чем 5 °С/ч. Однако, в более поздних работах (Faure et al., 2003, Ettler et al., 2009) отмечено, что скорость охлаждения в природных условиях может отличаться от систем, в которых преобладает фаялит. Логично предположить, что при металлургическом переделе в древности процесс остывания был значительно более быстрым (рис. 10).

Оценка температур кристаллизации по валовому составу шлаков и стекла на фазовой диаграмме CaO-SiO₂-FeO (Bowen, Posnjak, 1933; Osborn, Muan, 1960) показывает сходные результаты (рис. 11). Валовой состав хромитсодержащих образцов находится в высокотемпературной области 1200–1600 °С, а сульфидсодержащий тип с малым количеством кремнистого стекла – в области 1100–1200 °С.

Основными железосодержащими компонентами в шлаках являются оливин, магнетит, вюстит,

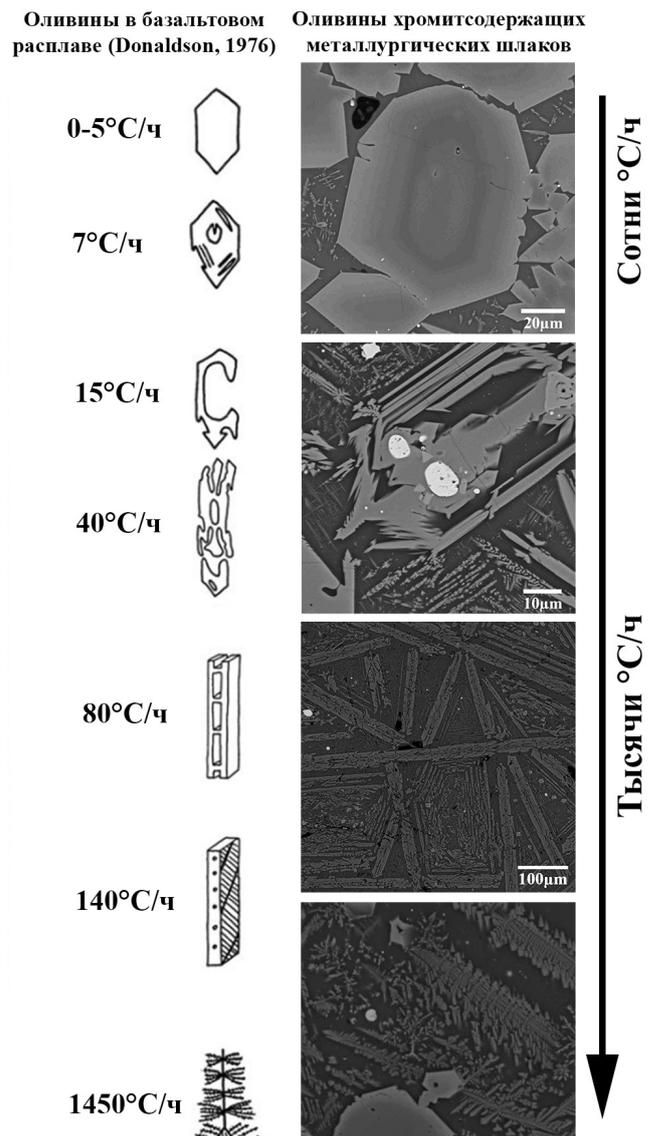


Рис. 10. Морфология кристаллов оливина и скорость остывания расплава базальтов и древних оливиновых шлаков Южного Зауралья.

Fig. 10. Morphology of olivine crystals and cooling rate of basalt melt and ancient olivine slags of the South Transuralia.

пироксен. За счет низких содержаний железа точки анализов стекла попадают в более высокотемпературные области, при этом они также хорошо разделяются по минералогическим типам, образуя компактные поля. Содержание SiO₂ в оливиновых шлаках Зауралья значительно ниже, чем в стекловатых и пироксеновых приуральских аналогах, рудным протолитом для которых являлись медистые песчаники, состоящие, в основном, из кварца и полевых шпатов (Каргалы, 2004; Hauptmann, 2007). Наиболее высокотемпературную область занимает поле стекловатых сульфидсодержащих

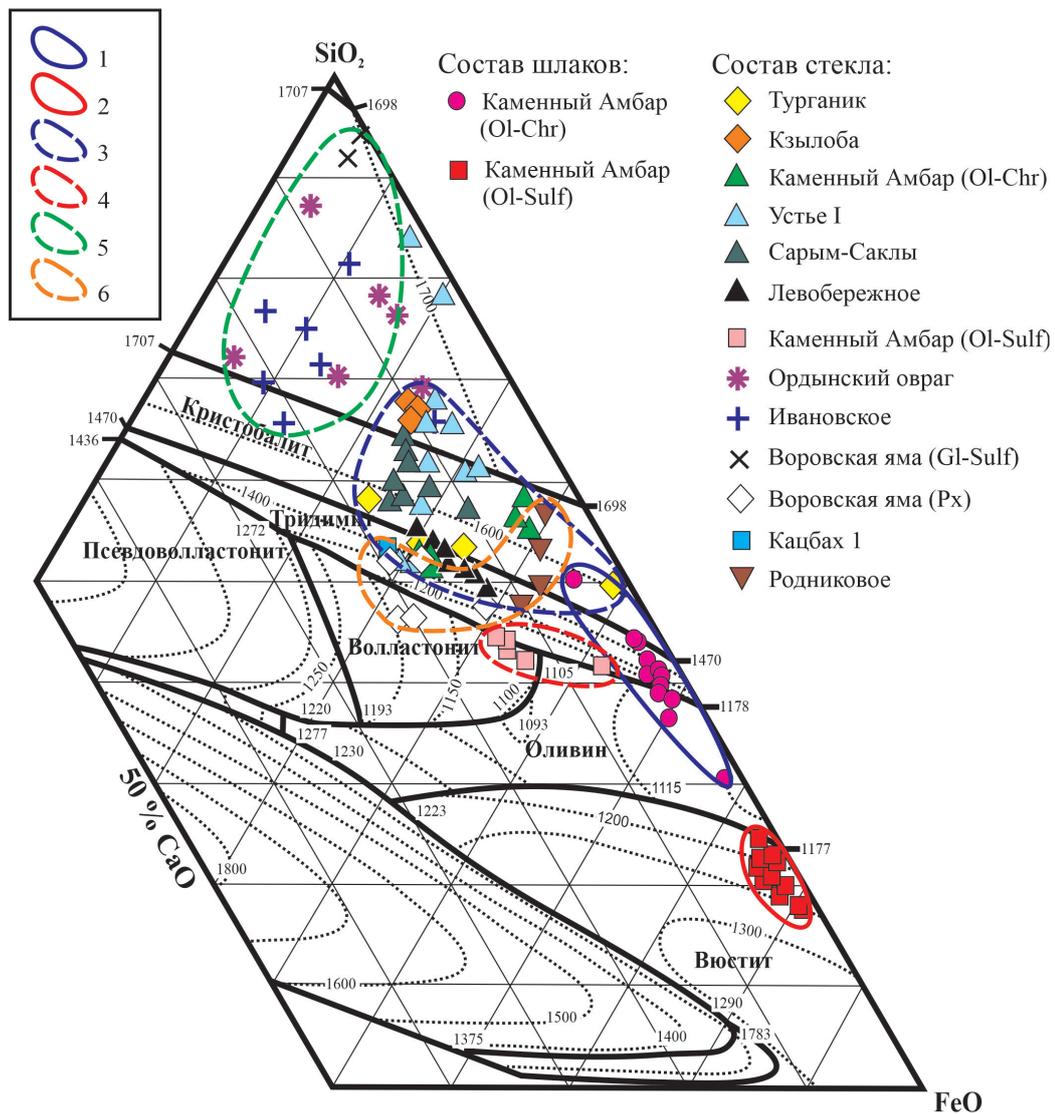


Рис. 11. Составы древних металлургических шлаков на фазовой диаграмме CaO-SiO₂-FeO (Bowen, Posnjak, 1933; Osborn, Muan, 1960).

1, 2 – валовый состав оливиновых хромитсодержащих (1) и сульфидсодержащих (2) шлаков поселения Каменный Амбар; 3–6 – состав стекла оливиновых хромитсодержащих шлаков (поселения Каменный Амбар, Устье I, Сарым-Саклы, Левобережное, Турганик; рудник Кзылоба) (3), оливиновых сульфидсодержащих шлаков (поселение Каменный Амбар) (4), стекловатых сульфидсодержащих шлаков (поселение Ивановское, рудники Воровская яма и Ордынский овраг) (5) и пироксеновых шлаков (поселения Кацбах I, Родниковое, рудник Воровская яма) (6).

Fig. 11. Composition of ancient metallurgical slags on phase diagram CaO-SiO₂-FeO (Bowen, Posnjak, 1933; Osborn, Muan, 1960).

1, 2 – bulk composition of chromite-bearing (1) and sulfide-bearing (2) olivine slags from settlement of Kamenny Ambar; 3–6 – composition of glass of chromite-bearing olivine slags (settlements of Kamenny Ambar, Ust'e I, Sarym-Sakly, Levoberezhnoe, Turganik; Kzyloba mine) (3), sulfide-bearing olivine slags (settlement of Kamenny Ambar) (4), sulfide-bearing glassy slags (settlement of Ivanovka; Vorovskaya Yama and Orda Ovrage mine) (5) and pyroxene slags (settlements of Katzakh 1 and Rodnikovoe; Vorovskaya Yama mine) (6).

шлаков поселения Ивановское и рудника Ордынский овраг. Экспериментальные исследования по выплавке меди из медистых песчаников Приуралья показали, что максимальные температуры соответствовали 1200–1300 °С (Богданов, 2019).

Последовательность кристаллизации металлургических шлаков бронзового века

По результатам экспериментальных работ и оценки температуры кристаллизации могут быть

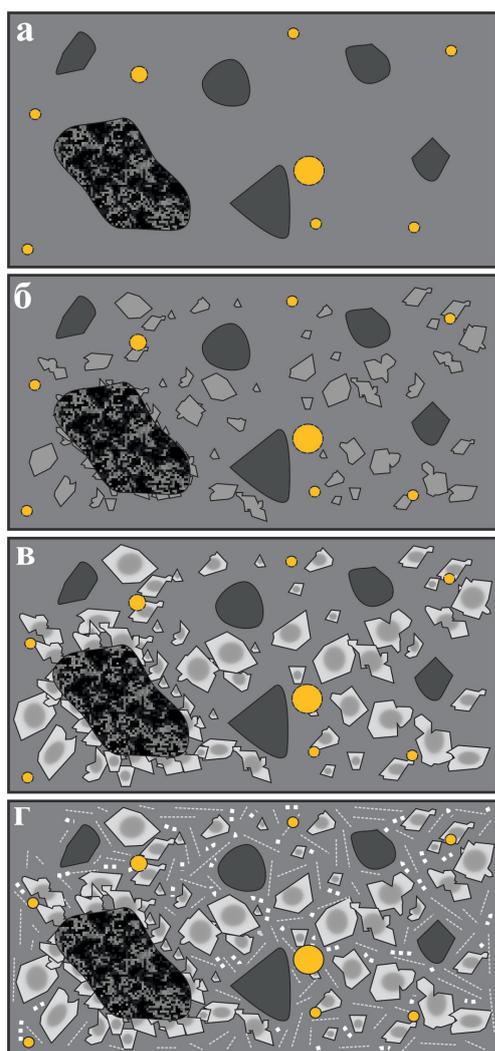


Рис. 12. Схема кристаллизации оливинового хромитсодержащего шлака.

Fig. 12. Crystallization scheme of chromite-bearing olivine slag.

предложены следующие схемы кристаллизации металлургических шлаков бронзового века.

Кристаллизация оливинового хромитсодержащего шлака. При температуре >1250 °С система представляет высокожелезистый ультраосновной расплав, в котором находятся реликты хромшпинелидов, серпентинизированных ультрабазитов и капли расплавленной меди (рис. 12а). Температурная устойчивость серпентинита составляет около 900 °С, поэтому он реагирует с расплавом на всем протяжении прогрева и остывания, реликты оставались только в результате наличия крупных фрагментов. При температуре 1200–1150 °С происходит кристаллизация высокомагнезиальных оливинов состава Fo_{30-50} в зависимости от состава расплава/протолита (рис. 12б). На границе релик-

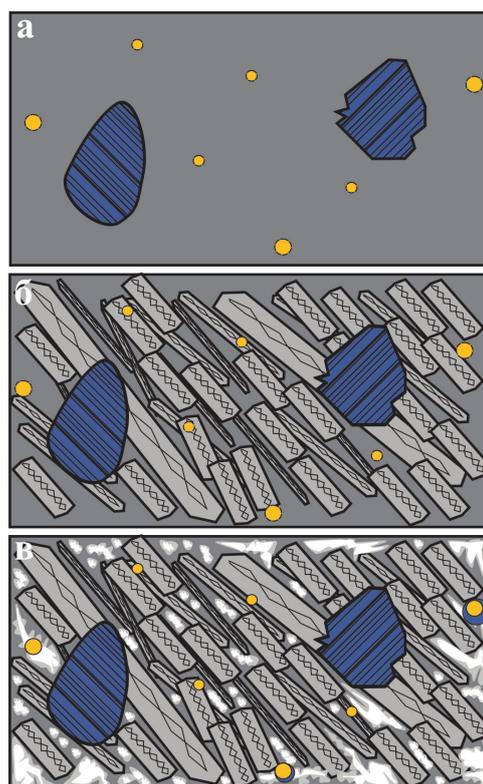


Рис. 13. Схема кристаллизации оливинового сульфидсодержащего шлака.

Fig. 13. Crystallization scheme of sulfide-bearing olivine slag.

тов серпентинитов образуются мелкие кристаллы оливина. На этой стадии большая часть Mg и частично Fe из расплава переходит в оливин. При температуре 1150–1100 °С образуется фаялитовая кайма и скелетные кристаллы оливина состава Fo_{5-30} в зависимости от состава расплава/протолита (рис. 12в). Этап проходит довольно быстро, поэтому при росте оливин захватывает включения расплава, позднее застывающие в стекло. При температуре 1100–1050 °С формируются мелкие идиоморфные зерна и скелетные кристаллы магнетита (рис. 12г). Завершается формирование кристаллов оливина. Последним этапом кристаллизации является затвердевание стекла и металлических фаз.

Кристаллизация оливинового сульфидсодержащего шлака. Расплав этого типа по данным фазовых диаграмм имел более низкую температуру, а его кристаллизация проходила быстрее, чем в хромитсодержащей разновидности. При температуре >1150 °С фиксируется низкокремнистый крайне высокожелезистый расплав, в котором находятся реликты вторичных сульфидов (халькозина и ковеллина) и капли расплавленной меди (рис. 13а).

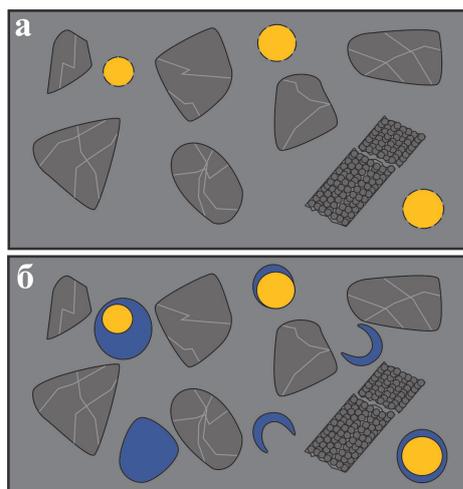


Рис. 14. Схема кристаллизации стекловатого сульфидсодержащего шлака.

Fig. 14. Crystallization scheme of sulfide-bearing glassy slag.

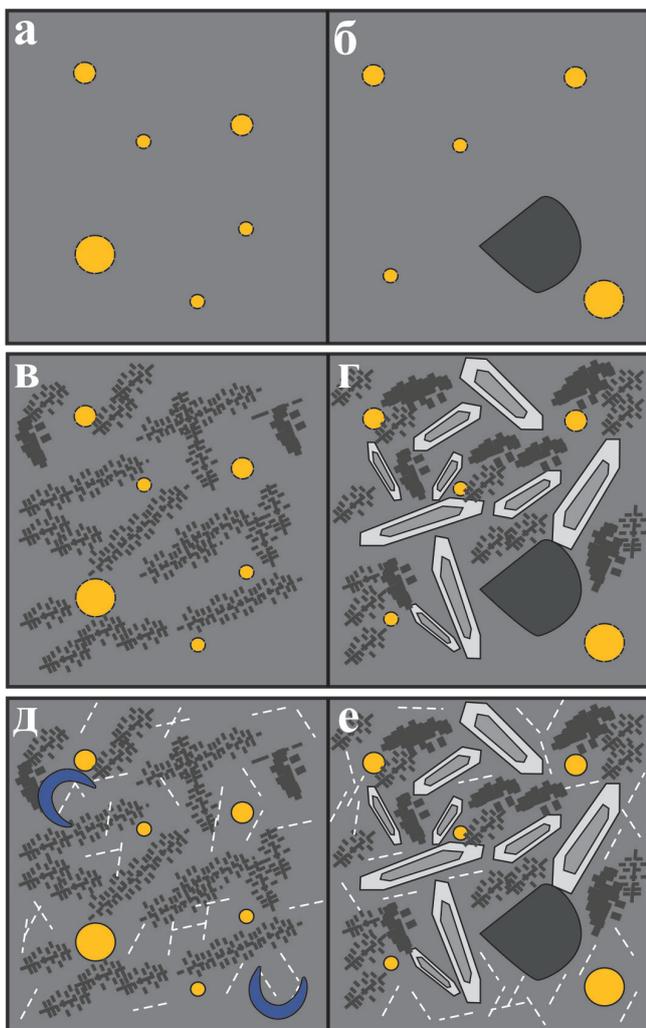


Рис. 15. Схема кристаллизации пироксенового шлака.

Fig. 15. Crystallization scheme of pyroxene slag.

Учитывая низкую температуру плавления сульфидов, реликты в расплаве оставались только в результате наличия крупных фрагментов. При температуре 1150–1100 °С происходит быстрая кристаллизация цепочечных и скелетных кристаллов фаялита, зачастую ориентированных субпараллельно (рис. 13б). Более низкая начальная температура, низкое содержание Mg в расплаве, а также быстрое остывание расплава препятствует возникновению призматических зональных кристаллов. При температуре 1100–1050 °С продолжается рост цепочечных кристаллов оливина (рис. 13в). Железо, не вошедшее в оливин, выпадает в виде скелетных и амбовидных агрегатов магнетита и вюститита. Процесс идет с повышением степени окисления расплава из-за его контакта с воздухом. На финальных этапах затвердевает стекло и металлические фазы. Из-за присутствия серы формируются халькозин-ковеллиновые оторочки вокруг капель меди.

Кристаллизация стекловатого сульфидсодержащего шлака. Расплав этого типа по данным фазовых диаграмм имел более высокую температуру, чем оливиновые разновидности. Остывание и затвердевание шлаков проходило быстрее, чем у других типов. При температуре >1200 °С фиксируется низко железистый расплав основного-среднего состава, в котором находятся реликтовые трещиноватые зерна кварца и реликты окремненной древесины (рис. 14а). Реликты не реагируют с расплавом (или реагируют крайне слабо). В расплаве также находятся капли расплавленной меди. При температуре 1100–1050 °С в редких случаях формируются скелетные и перистые кристаллы пироксенов (рис. 14б). Затем затвердевает стекло. На финальном этапе затвердевают капли меди и вокруг них формируются каймы из тонких срастаний ковеллина и халькозина. Ковеллин и халькозин также образуют капли различной формы и «полумесяцы». Происходит застывание стекла.

Кристаллизация пироксенового шлака. Пироксеновый тип весьма разнороден по своему минеральному и химическому составу, а образцы сильно отличаются друг от друга на разных памятниках. Условия их образования и температурный режим также могли значительно отличаться. Судя по минеральному составу, пироксен мог кристаллизоваться и в шлаках стекловатого сульфидсодержащего типа при условии более продолжительного остывания расплава. При температуре >1150 °С образуется ультраосновной-основной высокожелезистый расплав, в котором находятся капли меди

(рис. 15а, б). В образцах Зауральского ГМЦ (рис. 15б) иногда присутствуют реликты хромшпинелидов. При температуре 1150–1100 °С в образцах Приуралья (рис. 15в) происходит быстрая кристаллизация скелетных кристаллов авгита, а в Зауральских шлаках (рис. 15г) кристаллизуются ящичные кристаллы волластонита, а позднее – пироксен (геденбергит). При температуре 1100–1050 °С железо, не вошедшее в пироксен, выпадает в виде скелетных кристаллов магнетита и входит в состав делафоссита (рис. 15д, е). Происходит затвердевание стекла и металлических фаз. В Приуральских шлаках образуются халькозин-ковеллиновые капли и «полумесяцы» (рис. 15д).

Выводы

Изученные типы шлаков из памятников бронзового века Южного Урала и Казахстана отличаются друг от друга по ряду параметров (минеральный состав, химический состав, реликтовые включения и др.) и не образуют смешанных типов. Оливиновые хромитсодержащие шлаки отличаются крупными зональными кристаллами фаялита, в центре кристаллов переходящими в железистый форстерит; а также присутствием реликтов хромшпинелидов и серпентинитов. Оливиновый сульфидсодержащий тип выделяется наличием цепочечных кристаллов фаялита, сростаний магнетита с вюститом, присутствием реликтовых обломков сульфидов. Стекловатые сульфидсодержащие характеризуются многочисленными реликтовыми обломками кварца и барита в стекле. Наиболее разнородными по составу являются пироксеновые шлаки, основными минералами которых являются авгит, геденбергит и волластонит, обладающий специфической ящичной морфологией. Стекловатые сульфидсодержащие и пироксеновые шлаки Приуралья могут быть результатом кристаллизации одного расплава в зависимости от скорости снижения температуры. Об этом свидетельствует присутствие этих типов на одном памятнике (Горный 1, Родниковое).

Изучение фазовых диаграмм, новообразованных минералов и экспериментальные исследования показали, что в оливиновых хромитсодержащих шлаках из расплава сначала формировался фаялит с большим количеством форстеритового минала, образуя центральную часть зерен, при этом температура могла превышать 1500 °С. При снижении температуры вокруг зерен образуется фаялитовая кайма, затем ксеноморфные и скелетные агрегаты магнетита, последним происходит

затвердевание стекла и металлических фаз меди. Процесс кристаллизации оливиновых сульфидсодержащих шлаков проходил быстрее и при более низких температурах (1200–1300 °С). Сначала из расплава формировались цепочки скелетных кристаллов фаялита, затем ксеноморфные агрегаты вюстита и магнетита, в конце проходило затвердевание стекла и металлических фаз. При остывании расплава стекловатого сульфидсодержащего типа происходило затвердевание стекла, формировались капли меди и сульфидного расплава в виде тонких халькозин-ковеллиновых сростаний. Максимальная температура расплава составляла 1300 °С. Расплав пироксеновых шлаков содержал меньше Si и больше Fe, чем в стекловатых шлаках, а процесс охлаждения шел медленнее благодаря чему из расплава кристаллизовались пироксены и волластонит.

Сравнение минералогических особенностей шлаков показывает, что оливиновый хромитсодержащий тип соответствует ямной или абашевской культуре Южного Приуралья и синташтинской культуре Зауральских памятников, оливиновые сульфидсодержащие шлаки встречены только в срубно-алакульском горизонте поселений Каменный Амбар и Коноплянка, стекловатый сульфидсодержащий и пироксеновый тип соответствуют срубной культуре Приуралья и срубно-алакульской культуре Зауральских памятников, а также Западного и Центрального Казахстана. Образование различных типов шлаков связано с широким спектром производственных критериев: наличием определенных месторождений в регионе, типом используемой руды, технологией выплавки металла, применяемыми флюсами. На одной территории особенности горного дела и металлургии могут меняться с течением времени (Григорьев, 2013; Анкушев, 2019), при этом с миграцией населения металлургические технологии могли распространяться на другие территории, модифицируясь с учетом разработки новых месторождений (Григорьев, 2013). Фиксация преобразования и распространения этих особенностей с помощью изучения металлургических шлаков наиболее надежна.

Авторы благодарны Е.В. Белогуб за ценные консультации, а также выражают признательность С.В. Богданову, Н.Б. Виноградову, А.С. Ермолаевой, Л.Н. Коряковой, Н.Л. Моргуновой, Ф.Н. Петрову, В.В. Ткачеву, И.А. Файзуллину, А.В. Фомичеву, И.В. Чечушкову, С.В. Шариповой, А.М. Юминову за предоставление образцов металлургических шлаков.

Исследование проведено в рамках проекта РФФИ № 18-01-00036 (К) (18-00-00030 КОМФИ).

Литература

Аванесова Н.А. (1991) Культура пастушеских племен эпохи бронзы азиатской части СССР (по металлическим изделиям). Ташкент, Фан, 200 с.

Анкушев М.Н. (2019) Минералогия и источники сырья древних металлургических шлаков Южного Урала. *Металлогения древних и современных океанов-2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений*. Миасс, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 270–274.

Анкушев М.Н., Аласва И.П., Медведева П.С., Чечушков И.В., Шаранов Д.В. (2016) Минеральные микровключения в металлургических шлаках поселений бронзового века в долине р. Зингейка (Южный Урал). *Геоархеология и археологическая минералогия*. Миасс, ИМин УрО РАН, 116–120.

Анкушев М.Н., Артемьев Д.А., Блинов И.А. (2018) Элементы-примеси в зональных оливинах металлургических шлаков бронзового века на Южном Урале. *Минералогия*, 4(1), 55–67.

Анкушев М.Н., Рыжков В.М., Зайков В.В., Котляров В.А. (2013) Экспериментальные исследования по плавлению древних шлаков бронзолитейного производства из поселения Каменный Амбар (Южный Урал). *Минералы: строение, свойства, методы исследования*. Екатеринбург, ИГТ УрО РАН, 18–21.

Анкушев М.Н., Файзуллин И.А., Блинов И.А. (2019) Металлургические шлаки поселения позднего бронзового века Родниковое. *Геоархеология и археологическая минералогия*. Миасс, ИМин ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, 98–102.

Анкушев М.Н., Юминов А.М., Зайков В.В., Носкевич В.В. (2018) Медные рудники бронзового века в Южном Зауралье. *Известия Иркутского государственного университета. Серия Геоархеология. Этнология. Антропология*, 23, 87–110.

Богданов С.В. (2019) Триада В.А. Городцова в аспекте преемственности традиций горно-металлургического производства Восточной Европы. *Древности Восточной Европы, Центральной Азии и Южной Сибири в контексте связей и взаимодействий в евразийском культурном пространстве (новые данные и концепции) Мат. междунар. конф. к 100-летию отечеств. акад. археол.* Санкт-Петербург, ИИМК РАН, 143–146.

Богданов С.В., Ткачев В.В., Юминов А.М., Авраменко С.В. (2018) Геоархеологическая система исторических медных рудников Приуралья (Каргалинского) степного ГМЦ. *Геоархеология и археологическая минералогия*. Миасс, ИМин УрО РАН, 121–133.

Григорьев С.А. (2013) Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы. Челябинск, Цицеро, 660 с.

Дегтярева А.Д. (2010) История металлопроизводства Южного Зауралья в эпоху бронзы. Новосибирск, Наука, 162 с.

Древнее Устье: укрепленное поселение бронзового века в Южном Зауралье (2013) Отв. ред. Н.Б. Виноградов. Челябинск, Абрис, 482 с.

Ермолаева А.С., Кузьминых С.В., Пак Д.С., Дубягина Е.В. (2020) Предметы вооружения позднего бронзового века из мастерских литейщиков поселения Талдысай в Центральном Казахстане. *Stratum plus. Археология и культурная антропология*, 2, 109–120.

Зайков В.В., Юминов А.М., Дунаев А.Ю., Зданович Г.Б., Григорьев С.А. (2005) Геолого-минералогические исследования древних медных рудников на Южном Урале. *Археология, этнография и антропология Евразии*, 24(4), 101–114.

Зайков В.В., Юминов А.М., Анкушев М.Н., Ткачев В.В., Носкевич В.В., Епимахов А.В. (2013) Горно-металлургические центры бронзового века в Зауралье и Мугоджарах. *Известия Иркутского государственного университета. Серия. Геоархеология. Этнология. Антропология*, 1, 174–195.

Зданович Г.Б., Батанина И.М. (2007) Аркаим – «Страна городов». Пространство и образы. Челябинск, Крокус, 260 с.

Каргалы, том III: Селище Горный: Технология горно-металлургического производства: Археобиологические исследования (2004) Сост. и науч. ред. Е.Н. Черных. М., Языки славянской культуры, 320 с.

Корякова Л.Н., Краузе Р., Епимахов А.В., Шаранова С.В., Пантелеева С.Е., Берсенева Н.А., Фортнасье Й., Кайзер Э., Молчанов И.В., Чечушков И.В. (2011) Археологическое исследование укрепленного поселения Каменный Амбар (Ольгино). *Археология, этнография и антропология Евразии*, 48(4), 61–74.

Купцова Л.В., Файзуллин И.А. (2012) Родниковое поселение позднего бронзового века в Западном Оренбуржье. *Археологические памятники Оренбуржья*. Оренбург, ОГПУ, 70–100.

Моргунова Н.Л., Порохова О.И. (1989) Поселения срубной культуры в Оренбургской области. *Поселения срубной общности*, Воронеж, ВГУ, 160–172.

Моргунова Н.Л., Халяпин М.В. (2003) Новые исследования памятников эпохи бронзы в Центральном Оренбуржье. *Абашевская культурно-историческая общность: истоки, развитие, наследие. Материалы международной научной конференции*. Чебоксары, ЧГИГН, 225–229.

Моргунова Н.Л., Васильева И.Н., Кулькова М.А., Рослякова Н.В., Салугина Н.П., Турецкий М.А., Файзуллин А.А., Хохлова О.С. (2017) Турганикское поселение в Оренбургской области. Оренбург, ОГАУ, 300 с.

Моргунова Н.Л., Халяпин М.В., Халяпина О.А. (2001) II Кузьминковское поселение эпохи бронзы. *Археологические памятники Оренбуржья*. Оренбург, ОГПУ, 99–126.

- Петров Ф.Н., Анкушев М.Н., Медведева П.С.** (2018) Материальные свидетельства технологических процессов в культурном слое поселения левобережное (Синташта II): опыт функционального подхода. *Magistra Vitae: электронный журнал по историческим наукам и археологии*, 1, 112–147.
- Порохова О.И.** (1989) Срубно-алакульское Покровское поселение в Западном Оренбуржье. *Материалы по эпохе бронзы и раннего железного века Южного Приуралья и Нижнего Поволжья*. Уфа, БНЦ УрО АН СССР, 60–71.
- Ткачев В.В., Байтлеу Д.А., Юминов А.М., Анкушев М.Н., Жалмаганбетов Ж.М., Калиева Ж.С.** (2013) Новые исследования памятников горной археологии в Южных Мугалжарах. *Труды филиала Института археологии им. А.Х. Маргулана в г. Астана*. Астана, Издательская группа ФИА им. А.Х. Маргулана, 264–288.
- Черников С.С.** (1960) Восточный Казахстан в эпоху бронзы. *Материалы и археологические исследования в СССР*. М., АН СССР, 285 с.
- Черных Е.Н.** (1970) Древнейшая металлургия Урала и Поволжья. М. Наука, 181 с.
- Чухарева Н.С.** (2009) Сравнительный анализ хромшпинелидов из обломков пород и металлургических шлаков поселений бронзового века (Южный Урал). *Уральский минералогический сборник*, 16, 182–185.
- Шарапова С.В., Краузе Р., Молчанов И.В., Штоббе А., Солдаткин Н.В.** (2014) Междисциплинарные исследования поселения Коноплянка в Южном Зауралье: предварительные результаты. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: История, филология*. 13(3), 101–109.
- Addis A., Angelini I., Nimis P., Artioli G.** (2016) Late Bronze age copper smelting slags from Luserna (Trentino, Italy): interpretation of the metallurgical process. *Archaeometry*, 58(1), 96–114.
- Ankushev M.N., Artemyev D.A., Blinov I.A., Bogdanov S.V.** (2020) Bronze Age metallurgical slags from the South Urals: types, mineralogy and copper sources. *Periodica di mineralogia* (в печати).
- Artemyev D.A., Ankushev M.N.** (2019) Trace elements of Cu-(Fe)-sulfide inclusions in Bronze Age copper slags from South Urals and Kazakhstan: ore sources and alloying additions. *Minerals*, 9(12), 746.
- Bowen N.L., Schairer J.F.** (1932) The system FeO-SiO₂. *American Journal of Science*, 24, 177–213.
- Bowen N.L., Posnjak D.E.** (1933) The system CaO-FeO-SiO₂. *American Journal of Science*, 26, 193–284.
- Bowen N.L., Schairer J.F.** (1935) The system MgO-FeO-SiO₂. *American Journal of Science*, 26, 151–217.
- Caneva C., Giardino C.** (1994) Extractive techniques and alloying in prehistoric Central Anatolia: experimental methods in archaeometallurgy. *Archaeometry* 94, *Proceedings of the 29th International Symposium on Archaeometry*. Ankara, 451–459.
- Donaldson C.H.** (1976) An experimental investigation of olivine morphology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 57, 187–195.
- Epimakhov A., Krause R.** (2013) Relative and absolute chronology of the settlement Kamennyi Ambar. *Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Trans-Urals (Russia)*. Bonn, Frankfurter Archäologische Schriften 23, 129–146.
- Ettler V., Cervinka R., Johan Z.** (2009) Mineralogy of medieval slags from lead and silver smelting (Bohutin, Pribram district, Czech Republic): towards estimation of historical smelting conditions. *Archaeometry*, 51(6), 987–1007.
- Faure F., Troliard G., Nicollet C., Montel J.M.** (2003) A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145, 251–263.
- Hauptmann A.** (2007) The archaeometallurgy of copper – evidence from Faynan, Jordan. Springer, Berlin, 388 p.
- Kierczak J., Pietranik A.** (2011) Mineralogy and composition of historical Cu slags from the Rudawy Janowickie mountains, Southwestern Poland. *Canadian Mineralogist*, 49(5), 1281–1296.
- Osborn E.F., Muan F.A.** (1960) Phase equilibrium diagrams of oxide systems. American Ceramic Society with the Edward Orton Jr. Ceramic Foundation, Columbus, Ohio.
- Tumiati S., Casartelli P., Mambretti A. Martin S., Frizzo P. Rottoli M.** (2005) The ancient mine of Servette (Saint-Marcel, Val d'Aosta, Western Italian Alps): a mineralogical, metallurgical and charcoal analysis of furnace slags. *Archaeometry*, 47(2), 317–340.
- Woelk G., Gelhoit P., Bunk W.** (1998) Reconstruction and operation of a Bronze Age copperreduction furnace. *Metallurgica Antiqua: in honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin*. Bochum, Deutschen Bergbaumuseum, 72, 263–277.

References

- Addis A., Angelini I., Nimis P., Artioli G.** (2016) Late Bronze age copper smelting slags from Luserna (Trentino, Italy): interpretation of the metallurgical process. *Archaeometry*, 58(1), 96–114.
- [Ancient Ust'e: a fortified Bronze Age settlement in the Southern Transurals] (2013) Ed. N.B. Vinogradov. Chelyabinsk, Abris, 482 p. (in Russian)
- Ankushev M.N.** (2019) [Mineralogy and raw material sources of the South Urals ancient metallurgical slag]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2019. Chetvert veka dostisheniy v izuchenii submarinnaykh mestorozhdeniy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2019. Twenty five years of study of submarine deposits]*. Miass, IMin YuU FNTS MiG UrO RAN, 270–274. (in Russian)
- Ankushev M.N., Alaeva I.P., Medvedeva P.S., Chechushkov I.V., Sharapov D.V.** (2016) [Mineral

- microinclusions in metallurgical slags of the Bronze Age settlements in the Zingeyka River valley (South Urals)]. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya [Geoarchaeology and archaeological mineralogy]*. Miass, IMin UrO RAN, 116–120. (in Russian)
- Ankushev M.N., Artemyev D.A., Blinov I.A.** (2018) [Trace elements in zonal olivine of the Bronze Age metallurgical slags, South Urals]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, (4)1, 55–67. (in Russian)
- Ankushev M.N., Artemyev D.A., Blinov I.A., Bogdanov S.V.** (2020) Bronze Age metallurgical slags from the South Urals: types, mineralogy and copper sources. *Periodica di mineralogia* (in press).
- Ankushev M.N., Fayzullin I.A., Blinov I.A.** (2019) [Metallurgical slags of the late Bronze Age settlement of Rodnikovoe]. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya [Geoarchaeology and archaeological mineralogy]*. Miass, IMin YuU FNTS MiG UrO RAN, 98–102. (in Russian)
- Ankushev M.N., Ryzhkov V.M., Zaykov V.V., Kotlyarov V.A.** (2013) [Experimental melting of ancient slag of bronze production from the settlement of Kamenny Ambar (South Urals)]. *Mineraly: stroenie, svoystva, metody issledovaniya [Minerals: structure, properties, analytical methods]*, Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 18–21. (in Russian)
- Ankushev M.N., Yuminov A.M., Zaykov V.V., Noskevich V.V.** (2018) [Bronze Age copper mines in the South Transurals]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geoarkheologiya. Etnologiya. Antropologiya [Reports of Irkutsk State University. Series Geoarchaeology. Ethnology. Anthropology]*, 23, 87–110. (in Russian)
- Artemyev D.A., Ankushev M.N.** (2019) Trace elements of Cu-(Fe)-sulfide inclusions in Bronze Age copper slags from South Urals and Kazakhstan: ore sources and alloying additions. *Minerals*, 9(12), 746.
- Avanesova N.A.** (1991) [Culture of Bronze Age pastoralist tribes of the Asian part of the USSR (after metal products)]. Tashkent, Fan, 200 p. (in Russian)
- Bogdanov S.V.** (2019) [Triad of V.A. Gorodtsov from the viewpoint of the continuity of the traditions of mining and metallurgical production in the Eastern Europe]. *Drevnosti Vostochnoy Evropy, Tsentral'noy Azii i Yuzhnoy Sibiri v kontekste svyazey i vzaimodeystviy v evraziyskom kul'turnom prostranstve (novyye dannyye i kontseptsii). Materialy mezhdunarodnoy konferentsii k 100-letiyu otechestvennoy akademicheskoy arkheologii [Antiquities of Eastern Europe, Central Asia and Southern Siberia in the context of relations and interactions in the Eurasian cultural space (new data and concepts). Materials of the International Conference on the 100th anniversary of Russian academic archeology]*. Saint-Petersburg, IIMK RAN, 143–146. (in Russian)
- Bogdanov S.V., Tkachev V.V., Yuminov A.M., Avramenko S.V.** (2018) [Geoarchaeological system of the Cis-Urals (Kargaly) steppe MMC historical copper mines]. *Geoarkheologiya i arkheologicheskaya mineralogiya [Geoarchaeology and archaeological mineralogy]*. Miass, IMin UrO RAN, 121–133. (in Russian)
- Bowen N.L., Schairer J.F.** (1932) The system FeO-SiO₂. *American Journal of Science*, 24, 177–213.
- Bowen N.L., Posnjak D.E.** (1933) The system CaO-FeO-SiO₂. *American Journal of Science*, 26, 193–284.
- Bowen N.L., Schairer J.F.** (1935) The system MgO-FeO-SiO₂. *American Journal of Science*, 26, 151–217.
- Caneva C., Giardino C.** (1994) Extractive techniques and alloying in prehistoric Central Anatolia: experimental methods in archaeometallurgy. *Archaeometry 94, Proceedings of the 29th International Symposium on Archaeometry*. Ankara, 451–459.
- Chernikov S.S.** (1960) [East Kazakhstan in the Bronze Age]. *Materialy i arkheologicheskiye issledovaniya v SSSR [Materials and archaeological studies in the USSR]*. Moscow, AN SSSR, 285 p. (in Russian)
- Chernykh E.N.** (1970) [Ancient metallurgy of the Urals and Volga region]. M. Nauka, 181 p. (in Russian)
- Chukhareva N.S.** (2009) [Comparative analysis of chromites from rock fragments and metallurgical slags of the Bronze Age settlements (South Urals)]. *Ural'skiy mineralogicheskii sbornik [Ural Mineralogical Collection]*, 16, 182–185. (in Russian)
- Donaldson C.H.** (1976) An experimental investigation of olivine morphology. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 57, 187–195.
- Ermolaeva A.S., Kuzminykh S.V., Park D.S., Dubyagina E.V.** (2020) [Late Bronze Age weapons from the foundry manufactory of the settlement of Taldysay in Central Kazakhstan]. *Stratum plus. Arkheologiya i kulturnaya antropologiya [Stratum plus. Archeology and Cultural Anthropology]*, 2, 109–120. (in Russian)
- Epimakhov A., Krause R.** (2013) Relative and absolute chronology of the settlement Kamennyi Ambar. *Multidisciplinary investigations of the Bronze Age settlements in the Southern Trans-Urals (Russia)*. Bonn, Frankfurter Archäologische Schriften 23, 129–146.
- Ettler V., Cervinka R., Johan Z.** (2009) Mineralogy of medieval slags from lead and silver smelting (Bohutin, Pribram district, Czech Republic): towards estimation of historical smelting conditions. *Archaeometry*, 51(6), 987–1007.
- Faure F., Troiliard G., Nicollet C., Montel J.M.** (2003) A developmental model of olivine morphology as a function of the cooling rate and the degree of undercooling. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145, 251–263.
- Grigoryev S.A.** (2013) [Metallurgical production in the Northern Eurasia in the Bronze Age]. Chelyabinsk, Tsitsero, 660 p. (in Russian)
- Hauptmann A.** (2007) The archaeometallurgy of copper – evidence from Faynan, Jordan. Springer, Berlin, 388 p.
- [Kargaly, Vol. III: settlement of Gorny: technology of mining and metallurgical production: archeobiological

Research] (2004) Compiled and edited by E.N. Chernykh. M., Yazyki slavyanskoy kultury, 320 p. (in Russian)

Kierczak J., Pietranik A. (2011) Mineralogy and composition of historical Cu slags from the Rudawy Janowickie mountains, Southwestern Poland. *Canadian Mineralogist*, **49**(5), 1281–1296.

Koryakova L.N., Epimakhov A.V., Sharapova S.V., Panteleyeva S.E., Berseneva N.A., Molchanov I.V., Krause R., Fornasier J., Kaiser E., Chechushkov I.V. (2011) Archaeological studies of the Kamenny Ambar (Olgino) fortified settlement. *Archaeology, Ethnology and Anthropology of Eurasia*, **39**(4), 61–74.

Kuptsova L.V., Fayzullin I.A. (2012) [Late Bronze Age settlement of Rodnikovoe in the Westn Orenburg region]. *Arkheologicheskiye pamyatniki Orenburzh'ya* [Archaeological Sites of the Orenburg Region]. Orenburg, OGPU, 70–100. (in Russian)

Morgunova N.L., Khalyapin M.V., Khalyapina O.A. (2001) [Bronze Age II settlement of Kuzminkovskoe]. *Arkheologicheskiye pamyatniki Orenburzh'ya* [Archaeological Sites of the Orenburg Region]. Orenburg, OGPU, 99–126. (in Russian)

Morgunova N.L., Khalyapin M.V. (2003) [New study of Bronze Age sites in the Central Orenburg region]. *Abashevskaya kulturno-istoricheskaya obshchnost: istoki, razvitie, nasledie. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Abashevo cultural and historical community: origin, development, heritage. Materials of the international scientific conference]. Cheboksary, ChGIGN, 225–229. (in Russian)

Morgunova N.L., Porokhova O.I. (1989) [Srubna culture settlements in the Orenburg region]. *Poseleniya srubnoy obshchnosti* [Srubna community settlements]. Voronezh, VGU, 160–172. (in Russian)

Morgunova N.L., Vasilyeva I.N., Kulkova M.A., Roslyakova N.V., Salugina N.P., Turetsky M.A., Fayzullin A.A., Khokhlova O.S. (2017) [Settlement of Turganik in the Orenburg region]. Orenburg, OGAU, 300 p. (in Russian)

Osborn E.F., Muan F.A. (1960) Phase equilibrium diagrams of oxide systems. American Ceramic Society with the Edward Orton Jr. Ceramic Foundation, Columbus, Ohio.

Petrov F.N., Ankushev M.N., Medvedeva P.S. (2018) [Material evidence of technological processes in a cultural layer of the settlement of Levoberezhnoye (Sintashta II): a functional approach]. *Magistra Vitae: elektronnyy zhurnal po istoricheskim naukam i arkeologii* [Magistra Vitae: an Electronic Journal for Historical Sciences and Archeology], **1**, 112–147. (in Russian)

Porokhova O.I. (1989) [Srubna-Alakul settlement of Pokrovskoe in the West Orenburg region]. *Materialy po epokhe bronzy i rannego zheleznoogo veka Yuzhnogo Priural'ya i Nizhnego Povolzh'ya* [Materials on the Bronze Age and the Early Iron Age of the South Urals and Lower Volga region]. Ufa, BNTs UrO AN SSSR, 60–71. (in Russian)

Sharapova S.V., Krause R., Molchanov I.V., Shtobbe A., Soldatkin N.V. (2014) [Interdisciplinary study of the settlement of Konoplyanka in the South Transurals: preliminary results]. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Istoriya, filologiya* [Bulletin of Novosibirsk State University. Series: History, Philology]. **13**(3), 101–109. (in Russian)

Tkachev V.V., Baytleu D.A., Yuminov A.M., Ankushev M.N., Zhalmaganbetov Zh.M., Kalieva Zh.S. (2013) [New study of mining archeology sites in Southern Mugodzhary]. *Trudy filiala Instituta arkeologii im. A.Kh. Margulana* [Proceedings of the A. Kh. Margulan Astana Branch of the Institute of Archeology]. Astana, Izdatel'skaya gruppa FIA in A.Kh. Margulan, 264–288. (in Russian)

Tumiati S., Casartelli P., Mambretti A. Martin S., Frizzo P. Rottoli M. (2005) The ancient mine of Servette (Saint-Marcel, Val d'Aosta, Western Italian Alps): a mineralogical, metallurgical and charcoal analysis of furnace slags. *Archaeometry*, **47**(2), 317–340.

Woelk G., Gelhoit P., Bunk W. (1998) Reconstruction and operation of a Bronze Age copperreduction furnace. *Metallurgica Antiqua: in honour of Hans-Gert Bachmann and Robert Maddin*. Bochum, Deutschen Bergbaumuseum, 72, 263–277.

Zaykov V.V., Yuminov A.M., Dunaev A.Yu., Zdanovich G.B., Grigoriev S.A. (2005) [Geological and mineralogical study of the South Urals ancient copper mines]. *Arkheologiya, etnografiya i antropologiya Yevrazii* [Archaeology, Ethnography and Anthropology of Eurasia], **24**(4), 101–114. (in Russian)

Zaykov V.V., Yuminov A.M., Ankushev M.N., Tkachev V.V., Noskevich V.V., Epimakhov A.V. (2013) [Bronze Age mining metallurgical centers in the Transurals and Mugodzhary]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Geoarkheologiya. Etnologiya. Antropologiya* [Izvestiya of Irkutsk State University. Series Geoarchaeology. Ethnology. Anthropology], **1**, 174–195. (in Russian)

Zdanovich G.B., Batanina I.M. (2007) [Arkaim – a «country of towns». Space and images]. Chelyabinsk, Crocus, 260 p. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 28 июня 2020 г.