

бронзы каменный амбар в Южном Зауралье // Мат. междисциплинар. науч. конф. «Археология и естественные науки в изучении культурного слоя объектов археологического наследия» М.: Товарищество научных изданий КМК, 2018б. С. 197–204.

*Holliday V.T.* Soils in Archaeological Research. Oxford: Oxford University Press, 2004.

*Krause R., Koryakova L.N.* Multidisciplinary Investigations of the Bronze Age Settlements in the Southern Trans-Urals (Russia). Habelt, 2013.

*Peterson C.E., Drennan R.D.* Communities, settlements, sites, and surveys: regional-scale analysis of prehistoric human interaction // *American Antiquity*. 2005. V. 70 (1). P. 5–30.

*Sardesai V.* Introduction to Clinical Nutrition, Third Edition. CRC Press, 2011.

**Л.В. Суловицкий<sup>1</sup>, А.А. Костеров<sup>1</sup>, М.Н. Анкушев<sup>2</sup>, Л.Н. Корякова<sup>3</sup>  
L.V. Surovitskii, A.A. Kosterov, M.N. Ankushev, L.N. Koryakova**

<sup>1</sup>СПбГУ, г. Санкт-Петербург, *lsurovit@mtu.edu*

<sup>2</sup>Институт минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс

<sup>3</sup>Институт истории и археологии УрО РАН, г. Екатеринбург

## **Магнитные свойства археометаллургических шлаков Южного Зауралья: предварительные результаты**

### **Magnetic properties of archaeometallurgical slags from the Southern Trans-Urals: preliminary results**

Исследованы магнитные свойства образцов древних металлургических шлаков из поселения бронзового века Каменный Амбар. Показано, что основным магнитным минералом шлаков служит магнетит со значительной (до 0.2 катиона на формульную единицу) степенью замещения железа другими металлами, причем в большинстве изученных образцов присутствуют как минимум две ферритные фазы. Параметры петель магнитного гистерезиса соответствуют псевдо-однодоменному магнитному состоянию, что подразумевает достаточно малый (<10 мкм) размер магнитных частиц. Материал шлаков в принципе может быть использован для определения напряженности древнего геомагнитного поля.

Magnetic properties of archaeometallurgical slags from the Kamenny Ambar settlement (21st-18th cc. BCE) have been studied. The main magnetic mineral present in slags is magnetite with a significant (up to 0.2 cation per formula unit) degree of substitution of iron by other metals, and most of the studied samples contain at least two ferrite phases. Magnetic hysteresis parameters correspond to a pseudo-single-domain magnetic state implying rather fine (< 10  $\mu\text{m}$ ) size of magnetic particles. In principle, slag material can be used to determine the intensity of the ancient geomagnetic field.

В археомагнетизме исследуется поведение магнитного поля Земли в прошлом по археологическим артефактам, подвергшимся обжигу до высоких температур, и приобретшим таким образом термоостаточную намагниченность (TRM). Для построения моделей геомагнитного поля методом сферического гармонического анализа необходимы определения направления и величины поля, максимально равномерно распределенные и в пространстве (т.е., на поверхности Земли), и во времени. Такие модели играют важнейшую роль для понимания эволюции ядра Земли и процессов, происходящих на границе ядра и мантии [*cf.* Panovska et al., 2019]. Кроме того, наличие опорных кривых, описывающих поведение геомагнитного поля в прошлом для конкретного региона, дает возможность использовать их для датирования археологических памятников [Linford, 2004].

Памятники, связанные с древними металлургическими производствами, широко распространены в мире, начиная с VI тыс. до н.э. В процессе археологических раскопок таких памятников в больших количествах находят металлургические шлаки, которые в силу технологических требований к выплавке металла подверглись действию температур свыше 700°C. При этом шлаки обычно содержат большое количество магнитных минералов, приобретающих при охлаждении термоостаточную намагниченность и сохраняющих таким образом информацию о геомагнитном поле времени охлаждения. Дополнительным преимуществом археометаллургических памятников как объектов археомагнитных исследований служит то, что остатки металлургического производства, как правило, содержат обильный материал (уголь очагов, уголь в шлаках и т.п.), который можно датировать радиоуглеродным методом. Древние металлургические шлаки, таким образом, представляются перспективным объектом для археомагнитных исследований, в особенности для определения напряженности древнего геомагнитного поля. В то же время, магнитные свойства шлаков изучены относительно слабо, что затрудняет выбор наиболее пригодных образцов для экспериментов и оценку надежности получаемых результатов.

С целью оценки пригодности для археомагнитных исследований были изучены магнитные свойства образцов шлаков из поселения бронзового века Каменный Амбар (XXI–XVIII вв. до н.э.) [Корякова и др., 2011]. Минералогия шлаков поселения Каменный Амбар представлена оливином, магнетитом, вюститом, стеклом основного состава, реликтовыми хромшпинелидами, сульфидами, кварцем и серпентинитом [Анкушев и др., 2021]. При комнатной температуре измерялись петли магнитного гистерезиса и кривые перемагничивания. Температурные зависимости магнитной восприимчивости и намагниченности насыщения измерялись на воздухе в интервале температур от комнатной до 700°C. Кроме того, для представительных образцов измерены термомагнитные кривые при криогенных температурах (1.8–300 К).

Параметры петель гистерезиса приведены в таблице, а соответствующая диаграмма Дзю-Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002] представлена на рис. 1. Все шлаки, кроме одного из фрагментов образца #5, сильномагнитны; так, шлак #1 содержит >20 % магнитной фазы в пересчете на магнетит. Параметры петель гистерезиса, однако, скорее отвечают псевдооднодоменному магнитному состоянию, нежели многодоменному; соответственно, можно полагать, что размер частиц магнитной фракции не превышает 10 мкм. Измерения на различных фрагментах одних и тех же шлаков показывают их значительную неоднородность. Вариация параметров петель гистерезиса между различными шлаками также довольно велика.

Температурные зависимости магнитной восприимчивости представительных образцов показаны на рис. 2а–в. Соответствующие температуры Кюри, отвечающие переходу ферромагнитной фазы в парамагнитную, приведены в таблице. Судя по термомагнитным кривым, во всех образцах, кроме #2 (рис. 2б), присутствуют две магнитные фазы. Магнетит присутствует только в образце #1, причем он, судя по пониженной температуре фазового перехода Вервея (100 К, рис. 2г), содержит некоторое количество примесей. При этом, однако, температура Кюри основной фазы у него близка таковой для чистого магнетита (575°C). У прочих образцов температуры Кюри заметно ниже, а переход Вервея отсутствует. Соответственно, можно заключить, что ферритные фазы содержат 0.1–0.2 атомов примесей на формульную единицу.

Пригодность шлаков для определения напряженности древнего геомагнитного поля предстоит изучить дополнительно. По предварительным результатам термомагнитного анализа можно видеть, что большинство образцов обладает достаточной

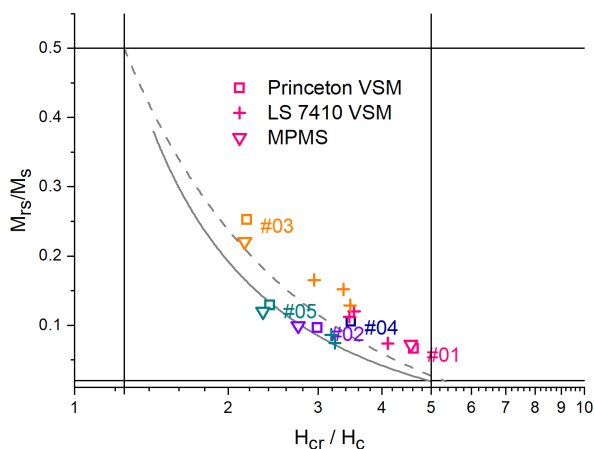


Рис. 1. Диаграмма Дэя-Данлопа [Day et al., 1977; Dunlop, 2002] для исследованных образцов шлаков. Петли гистерезиса на вибрационных магнитометрах (VSM) измерялись в максимальном поле 1.8 Тл, на установке MPMS – в поле 7 Тл.

Таблица

**Параметры петель магнитного гистерезиса и температуры Кюри исследованных шлаков**

Образец	$M_s$ (Ам <sup>2</sup> /кг)	$M_{rs}$ (Ам <sup>2</sup> /кг)	$H_c$ (mT)	$H_{cr}$ (mT)	$M_{rs}/M_s$	$H_{cr}/H_c$	$T_c$ (°C)
Princeton VSM							
#01 (б/н)	21.20	1.414	5.886	27.17	0.0667	4.62	538; 575
#02 (б/н)	5.157	0.4971	8.674	25.92	0.0964	2.99	454
#03 (б/н)	3.819	0.9641	32.74	71.24	0.252	2.18	543; 564
#04 (717/1437)	9.221	0.9718	8.177	28.47	0.105	3.48	487; 564
#05 (717/1570)	0.2101	0.02716	8.61	20.77	0.129	2.41	422; 482
LakeShore 7410 VSM							
1a (б/н)	24.55	2.760	15.86	54.83	0.112	3.46	
1b (б/н)	24.87	2.977	13.02	45.97	0.120	3.53	
1c (б/н)	23.55	1.739	8.793	36.15	0.0738	4.11	
3a (б/н)	8.648	1.312	16.96	57.06	0.152	3.36	
3b (б/н)	9.378	1.551	16.81	49.6	0.165	2.95	
3c (б/н)	7.581	0.9743	12.24	42.44	0.129	3.47	
5a (717/1570)	2.842	0.245	6.856	21.82	0.0862	3.18	
5b (717/1570)	3.861	0.2874	5.953	19.28	0.0744	3.24	
MPMS							
#01 (б/н)	27.46	1.972	6.580	30.03	0.07181	4.56	
#02 (б/н)	6.696	0.6643	8.344	22.89	0.09921	2.74	
#03 (б/н)	5.573	1.229	33.03	71.17	0.22053	2.15	
#05 (717/1570)	2.622	0.3135	8.380	19.61	0.11957	2.34	

Примечание.  $M_s$ ,  $M_{rs}$  – нормированные на массу намагниченность насыщения и остаточная намагниченность насыщения, соответственно;  $H_c$ ,  $H_{cr}$  – коэрцитивная сила и коэрцитивная сила по остаточной намагниченности;  $T_c$  – температура Кюри.

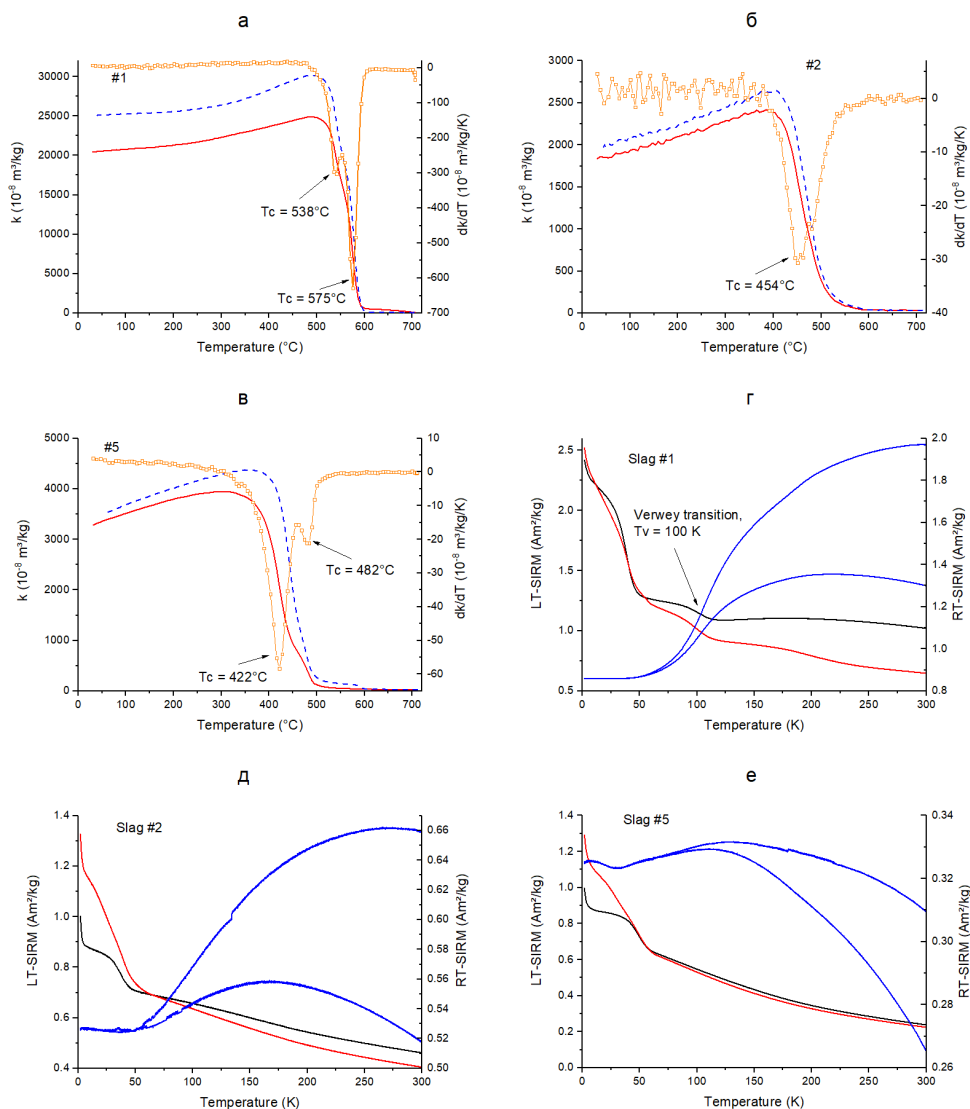


Рис. 2. (а–в) Температурные зависимости магнитной восприимчивости. Кривые нагрева показаны красными сплошными линиями, кривые охлаждения – синими пунктирными. Температуры Кюри определялись как минимумы производных от кривых нагрева (оранжевые, масштаб на правой оси ординат). (г–е) Температурное размагничивание остаточной намагниченности насыщения, созданной при 1.8 К после охлаждения в нулевом магнитном поле (ZFC, черная кривая) и в магнитном поле 5 Тл (FC, красная кривая), и эволюция остаточной намагниченности насыщения, созданной при 300 К, в ходе температурного цикла 300–1.8–300 К в нулевом поле (синяя кривая, масштаб на правой оси ординат). Для образца #1 стрелкой показан фазовый переход Вервея, характерный для магнетита.

стабильностью (обратимостью) при нагреве, что является необходимым условием для экспериментов по определению напряжённости древнего поля нагревными методами, например, методом Телье [Thellier & Thellier, 1959; Coe, 1967] или методом Триакс [Le Goff, Gallet, 2004]. Размер зерна магнитной фракции соответствует так называемому псевдооднодоменному состоянию, что дает возможность получения определения напряжённости древнего поля, удовлетворяющие принятым критериям качества [cf. Paterson et al., 2014].

## Литература

Анкушев М.Н., Зайков В.В., Молчанов И.В., Корякова Л.Н., Пантелеева С.Е., Юминов А.М. Металлургические шлаки и фрагменты руд с поселения бронзового века Каменный амбар (Южное Зауралье): ключ к определению источников медного сырья // Теория и практика археологических исследований. 2021. Т. 33. № 1. С. 34–57.

Корякова Л.Н., Краузе Р., Епимахов А.В., Шарапова С.В., Пантелеева С.Е., Берсенева Н.А., Формасье Й., Кайзер Э., Молчанов И.В., Чечушков И.В. Археологическое исследование укрепленного поселения Каменный Амбар (Ольгино) // Археология, этнография и антропология Евразии. 2011. Т. 48. № 4. С. 61–74.

Coe R.S. Paleo-Intensities of the Earth's magnetic field determined from Tertiary and Quaternary rocks // Journal of Geophysical Research. 1967. Vol. 72. P. 3247–3262.

Day R., Fuller M., Schmidt V.A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence // Physics of Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 13. P. 260–267.

Dunlop D.J. Theory and application of the Day plot ( $M_{is}/M_s$  versus  $H_{cr}/H_c$ ) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107(B3). doi:10.1029/2001JB000486.

Le Goff M., Gallet Y. A new three-axis vibrating sample magnetometer for continuous high-temperature magnetization measurements: applications to paleo- and archeo-intensity determinations // Earth and Planetary Science Letters. 2004. Vol. 229. P. 31–43.

Linford P. Archaeomagnetic dating // Physics Education. 2004. Vol. 39(2). P. 145–154.

Panovska S., Korte M., Constable C.G. One hundred thousand years of geomagnetic field evolution // Reviews of Geophysics. 2019. Vol. 57(4). P. 1289–1337.

Paterson G.A., Tauxe L., Biggin A.J., Shaar R., Jonestrask L.C. On improving the selection of Thellier-type paleointensity data // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. Vol. 15(4). P. 1180–1192.

Thellier E., Thellier O. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // Annales de Géophysique. 1959. Vol. 15. P. 285–376.