

Литература

Казанский М.М. Скандинавская меховая торговля и «Восточный путь» в эпоху переселения народов // *Stratum plus*. 2010. № 4. С. 17–127.

Кулькова М.А., Гусенцова Т.М., Мадянова Н.П. Применение метода геохимической индикации для реконструкции функциональных зон на памятниках каменного века Приневского региона // *Известия РГПУ им. А.И. Герцена* № 176. 2015. СПб.: РГПУ. С. 76–89.

Кулькова М.А. Методы прикладных палеоландшафтных геохимических исследований. СПб.: РГПУ, 2012.

Раззак М.А. Отчет по договору с ЛОО РГО №141/07/2019 от 1 июля 2019 г. на выполнение научно-исследовательских археологических работ в виде разведки на о. Мощный и проведение археологических раскопок могильника Керстово 1 (Новоселки 1) в Кингисеппском районе Ленинградской области. 2019. С. 54.

Сакса А.И. Острова восточной части Финского залива в контексте археологических памятников Эстонии, Финляндии и Карельского перешейка // *Бюллетень ИИМК РАН* № 4. СПб., 2014. С. 153–158.

Miettinen T. Suomenlahden ulkosaarten esihistoria // *Suomenlahden ulkosaaret – Lavansari, Seiskari, Suursaari, Tytärsaari*. Helsinki, 1996. P. 52–67.

**С.Ю. Давыденко¹, С.А. Терёшкин², А.Ю. Давыденко^{2,3},
С.В. Снопков³, А.В. Паршин², Ю.А. Давыденко²
S.Y. Davydenko, S.A. Tereshkin, A.Y. Davydenko,
S.V. Snopkov, A.V. Parshin Y.A. Davydenko**

¹Российский государственный геологоразведочный институт, г. Москва, sofydav@mail.ru

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск

³Иркутский государственный университет, г. Иркутск

Применение БПЛА и наземных геофизических методов при изучении древнего металлургического комплекса на участке Барун-Хал II (Западное Прибайкалье)

The use of UAVs and ground geophysical methods for the study of the ancient metallurgical complex in the Barun-Khal II (Western Baikal region)

На западном побережье центральной части Байкала имеется множество находок древних металлургических комплексов. Данный регион находится в складчатом каркасе Сибирской платформы, представленном глубокометаморфизованными породами Ольхонского кристаллического комплекса, и характеризуется сложным строением с большим количеством локальных неоднородностей в приповерхностном слое, что создает проблему отделения археологических объектов от геологических. С целью оптимизации поисков и изучения археологических памятников рассматриваются возможности современных геофизических технологий: наземных и беспилотных аэромагнитных съемок, а также электротомографии, с обработкой в классе 3D-моделей. Сопоставление результатов трехмерного моделирования на хорошо изученном объекте древней металлургии Бурун-Хал II дало возможность оценить эффективность используемых методов съемки. Показано, что выполненная по данным наземных и беспилотных аэромагнитных съемок инверсия магнитных полей с использованием векторного сканирования и регрессии по методу эластичной сети позволяет получать пространственное распределение магнитной восприимчивости и вектора остаточной намагниченности и различать искусственные и геологические объекты.

On the western coast of the central part of Lake Baikal, there are many finds of ancient metallurgic complexes. This region is located in the fold frame of the Siberian platform, represented by deeply metamorphosed rocks of the Olkhon crystalline complex and it is characterized by a very complex structure with a large number of local inhomogeneities in the near-surface layer, which creates the problem of separating archaeological objects from geological ones. In order to optimize the search and study of archaeological sites, the possibilities of modern geophysical technologies are considered: ground-based and unmanned aeromagnetic surveys, as well as electrotomography, with processing in the class of 3D models. A comparison of the results of three-dimensional modeling on a well-studied object of ancient metallurgy Burunkhal II made it possible to evaluate the effectiveness of the survey methods used. The inversion of magnetic fields, carried out on the basis of data from ground-based and unmanned aeromagnetic surveys, using vector scanning and a regression elastic net, makes it possible to obtain the spatial distribution of magnetic susceptibility and remanent magnetization and distinguish between the artificial and geological origin of the object.

Современным способом обработки и интерпретации данных магнитных и электромагнитных геофизических съемок является 3D инверсия, которая позволяет выполнить реконструкцию формы и положения в геологической среде скрытых объектов с аномальными магнитными свойствами. Для получения первичных данных, позволяющих выполнить 3D-инверсию, необходимо проводить плотные площадные работы, что в пешеходном наземном варианте требует значительных временных затрат и зачастую затруднено плохой проходимостью. Интенсивное развитие в последние годы БПЛА магнитометрии позволяет выполнять площадные съемки с обтеканием рельефа, быстро и высоким качеством. Беспилотные технологии активно применяются на поисковой стадии геологоразведочных работ, однако решение археологических задач требует существенно большей детальности. В данной работе на примере относительно небольших объектов древней металлургии сопоставляются результаты, полученные с помощью БПЛА-магнитной съемки, наземной магнитной съемки и наземной электротомографической съемки, анализируется производительность и информативность каждого метода на основе решения трехмерных обратных задач для каждого вида съемки. Приводится оригинальная методика каскадной векторной 3D-инверсии, позволяющая восстанавливать не только магнитную восприимчивость, но и остаточную намагниченность. На основе анализа результатов решения обратной задачи делается вывод целесообразности поиска таких относительно небольших объектов, как древние металлургические горны, с использованием высокопроизводительной и высокоточной магнитометрической системы с БПЛА-носителем. Следующим этапом целесообразно выполнить заверку аномалий методом электротомографии.

На западном побережье оз. Байкал встречаются следы железоделательного производства. В 1997 г. вблизи с. Шара-Тогот (Приольхонье) был открыт памятник древней металлургии железа Барун-Хал II (рис. 1а). По радиоуглеродному методу возраст памятника определен как 2180–1750 лет [Harinsky et al., 2012; Kozhevnikov, Harinsky, 2003; Snopkov et al., 2012]. Ямные горны памятников Барун-Хал II и Барун-Хал III имеют возраст конец I тыс. до н.э. – начало I тыс. н.э. В этот период использовалось два типа ямных горнов: воронкообразные и двухъямные. Горны первого типа сооружались в грунте на краю искусственной пригорновой ямы (или канавы). Рабочие камеры этих горнов имели воронкообразную форму, напоминающую перевернутую наклонную треугольную пирамиду с закругленными ребрами.

Древние железоделательные комплексы были обнаружены во многих местах Приольхонья. Во многих археологических памятниках встречаются изделия из железа, а металлургические шлаки распространены повсеместно. Связано это с тем, что с конца I тыс. до н.э. предметы из железа становятся важной составляющей в составе орудийного комплекса жителей данной территории. Отсутствие в данной местности месторождений железа при-

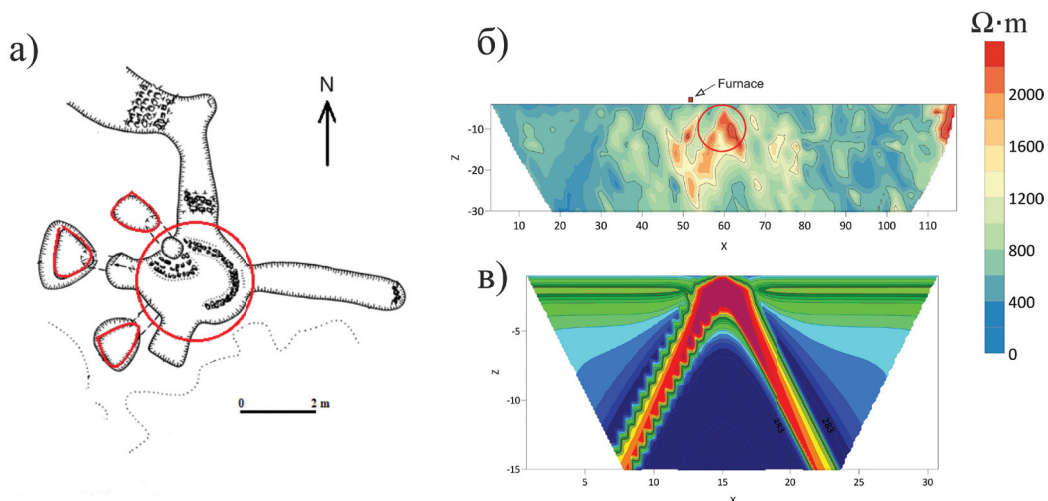


Рис. 1. Схема раскопа одного из железоделательных горнов в металлургическом центре Барун-Хал II (а); Разрез удельного электрического сопротивления по данным электротомографии через известный горн (б); Аномальный эффект от высокоомного куба (в).

вело к тому, что древние жители для производства орудий эксплуатировали локальные рудопрооявления, изготавливая большинство изделий из железа на месте.

В геологическом отношении участок относится к складчатому обрамлению Сибирской платформы и сложен глубокометаморфизованными породами ольхонского кристаллического комплекса. Для получения железа могли использоваться локальные рудопрооявления, такие как бурые железняки коры выветривания, магнетит гранит-пегматитовых жил, железистые кварциты отложений ольхонской серии; оруденелые гнейсы и кристаллосланцы иликтинской свиты, а также магнетит делювиальных отложений предгорий Приморского хребта.

Район для обнаружения объектов, относящихся к древним металлургическим центрам, занимает значительную территорию: несколько десятков километров в длину и несколько километров в ширину, что затрудняет поиски новых археологических объектов традиционными способами. Перспективным способом оптимизации поисков и изучения археологических памятников без их раскопки является применение геофизических методов – магниторазведка [Schmidt et al., 2020] с использованием 3D-инверсии данных [Cunningham et al., 2021] и электроразведка.

Магнитометрические исследования на участке Барун-Хал проводятся с 1998 г.. На эталонном объекте Барун-Хал II были проведены детальная наземная магнитная съемка (магнитометр Геоскан, 2017 г.), БПЛА-магниторазведка (аппаратурный комплекс SibGIS UAS [Parshin et al., 2020]) и электротомография (аппаратура Скала-64). Интерпретация данных на основе результатов 3D-инверсии позволила оценить эффективность каждого из методов, сравнить достоверность и информативность наблюдаемых данных и получаемых 3D-моделей скрытого объекта.

Для объекта Барун-Хал II проведен анализ результатов электротомографии, рассчитана прямая задача для высокоомного куба размерами $2 \times 2 \times 2$ м. Прямая задача была решена для дипольной установки, установки Шлюмберже и Веннера, что позволило выбрать дипольную установку (рис. 1в) с оптимальным расстоянием между профилями 2–2.5 м.

По данным электротомографии с дипольной установкой Скала-64, выделены остатки металлургического горна, которые не были вскрыты во время археологических раскопок.

В результате трехмерной инверсии по данным электротомографии были получены послойные карты УЭС верхней части разреза, позволившие выделить ряд объектов древней металлургии. Уточненная геоэлектрическая модель горна в долине Бурун–Хал характеризуется аномалией повышенного сопротивления (от 2000 до 3200 Ом*м) на фоне вмещающей среды с сопротивлением 200–300 Ом*м. Объект был выделен по характерной форме аномалии, соответствующей аномальному эффекту высокоомного куба (рис. 1б).

Оценка возможных магнитных эффектов для наземной и БПЛА-съемки была проведена на основе физико-геологической модели горна с характерными размерами $2 \times 2 \times 2$ м при глубине верхней кромки 0.5 м и средним значением эффективной магнитной восприимчивости $\kappa = 0.025$ ед. СИ. Учитывая существенный эффект термоостаточной намагниченности, для этой характеристики были приняты следующие параметры: коэффициент Кенигсбергера $Q = 1$; склонение $D_r = -30^\circ$ и $I_r = 60^\circ$. Параметры современного нормального магнитного поля для района: $T_0 = 60700$ нТл; $D_0 = -6^\circ$; $I_0 = 73^\circ$. Аномальные эффекты ΔT при высоте датчика 0.5 м для наземной съемки и 7.5 м для БПЛА-съемки имеют амплитуды около 300 и 4 нТл, соответственно, что достаточно для выделения объекта, учитывая реальную точность БПЛА-съемки на уровне 0.2–0.5 нТл. Влияние остаточной намагниченности проявляется в смещении максимумов относительно центра объекта.

Детальная пешеходная магнитная съемка на объекте была выполнена в 2017 г. с применением квантового магнитометра «Геоскан». Расстояние между профилями составляло 5 м, съемка велась в непрерывном режиме при высоте датчика магнитометра над земной поверхностью 0.5 м. Магнитное поле в районе аномалиеобразующего объекта достигает 330 нТл. Был выявлен магнитный «мусор» (антропогенное загрязнение местности), который дает аномалии значительно меньшей интенсивности.

Для выполнения магнитной съемки была использована беспилотная система SibGIS UAS [Parshin et al., 2020] с оверхаузеровским магнитометром [Sapunov et al., 2020], основным преимуществом которого являются высокоточные абсолютные измерения модуля полного вектора напряженности магнитного поля и отсутствие ориентационных погрешностей, которые в такой геометрии измерений оказали бы существенное влияние на результаты. Съемка выполнена по ортогональной сети профилей, расстояние между профилями 2 м, высота датчика – 7.5 м, частота измерений – 3 Гц (плотность точек по профилю ~1.5 м).

В результате оценки аномального эффекта от типичной модели древнего металлургического горна для двух вариантов магнитных съемок следующие: пешеходом и с БПЛА носителем сделан вывод, что оба способа магнитометрии позволяют точно идентифицировать аномальные объекты, хотя при наземной съемке амплитуда аномалии более чем на порядок выше, чем при съемке с БПЛА на высоте 7.5 м. Тем не менее, амплитуда аномалий, регистрируемых с воздуха, с учетом высокой точности магнитной съемки БПЛА, достаточна для картирования объектов и выполнения 3D-инверсии. С помощью каскадного метода 3D-инверсии магнитного поля [Davydenko, 2020] были получены трехмерные модели распределения магнитной восприимчивости, которые дают представление о структуре археологического объекта до стадии раскопок, при этом качество восстановления магнитных свойств искомым объектам фактически не зависит от того, как именно выполнялась съемка: в пешеходном варианте или с помощью БПЛА (рис. 2).

В результате трехмерной инверсии данных электротомографии были получены послойные карты УЭС верхней части разреза, на которых выделился ряд объектов древней металлургии. Объекты, идентифицированные методами электротомографии и БПЛА-магнитноразведки, в целом, совпадают, с поправкой на гораздо более редкую сеть электротомографических измерений.

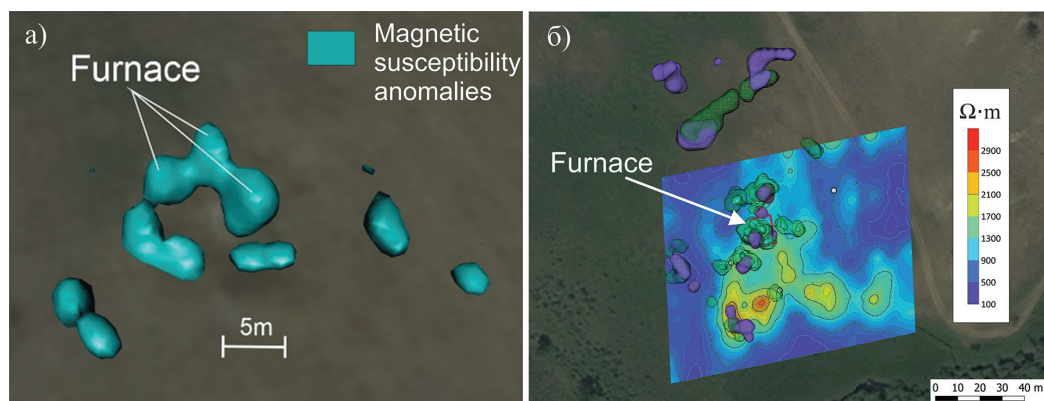


Рис. 2. Объекты с аномальной магнитной восприимчивостью. Детальная картина в районе раскопа (а); Сравнение результатов трехмерной инверсии электротомографии и результатов трехмерной каскадной инверсии (магнитной восприимчивости) данных БПЛА-магнитометрии и наземной магнитной съемки (б).

Таким образом, для поисков объектов древней металлургии печей следует использовать БПЛА-магниторазведку и электротомографию. При грамотном проектировании сети наблюдений эти методы обладают достаточными чувствительностью и разрешающей способностью.

В результате выполненных комплексных исследований удалось не только уточнить контуры известного эталонного объекта, но и обнаружить ранее неизвестные, которые в дальнейшем будут заверены археологическими раскопками.

Работа выполнена при поддержке РНФ, грант №20-67-47037. Авторы чрезвычайно благодарны за помощь в обработке, представлении данных А. Башкееву, А. Беловой, а также Е. Крайновой за оформление графических приложений.

Литература

- Cunningham M., Samson C., Laliberté J. Inversion of magnetic data acquired with a rotary-wing unmanned aircraft system for gold exploration // Pure Appl. Geophys. 2021.
- Davydenko A.Yu. Inversion of the magnetic field based on elastic network and vector scanning for assessing magnetic susceptibility and remanence of three-dimensional subjects. In: Issues of the theory and practice of geological interpretation of geophysical fields. Proceedings of the 47th Session of the International Seminar of D.G. Uspenskogo & V.N. Strakhov, 2020. Voronezh: Publishing and printing center «Scientific Book». P. 105–110 (in Russian).
- Harinsky A.V., Kozhevnikov N.O., Snopkov S.V. Metallurgical centers of the western coast of Lake Baikal in the I millennium AD. In: History and culture of the medieval people of steppe Eurasia: Materials II of the International Congress of medieval archaeology of the Eurasian steppes, 2012. Barnaul: Publishing house of the Altai University. 248 p.
- Parshin A.V., Budyak A.E., Babyak V.N. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: A case of additional flank exploration. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020. 459 (5), art. no. 052079.
- Sapunov V.A., Denisov A.Y., Savelyev V.V., Kiselev S.E., Narkhov E.D., Sergeev A.V., Fedorov A.L., Shirokov A.A., Popkov M.Y. Modernization of ground-based overhauser POS magnetometers to use on small unmanned copter-type aerial vehicles. In: Conference Proceedings of Engineering and Mining Geophysics 2020. P. 1–8.

Schmidt V., Becken M., Schmalzl J. A UAV-borne magnetic survey for archaeological prospection of a Celtic burial site // *First Break*. 2020. Vol. 38, Is. 8. P. 61–66.

Snopkov S.V., Matasova G.G., Kazansky A.Yu., Harinsky A.V., Kozhevnikov N.O. Ore sources for production of iron in the ancient time: Kurminsky archaeological site. In: *News of Laboratory of ancient technologies: the collection of scientific works / under the editorship of A.V. Harinsky*, 2012. Is. 9, Irkutsk: Publishing house of IrGTU. 196 p.

**А.Ю. Лобода^{1,2}, В.М. Пожидаев¹, С.Н. Малахов¹, Э.А. Хайрединова³, Е.Б. Яцишина^{1,2}
A.Yu. Loboda, V.M. Pozhidaev, S.N. Malakhov, E.A. Khairidinova, E.B. Yatsishina**

¹НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва,
lobodaau@mail.ru

²НИЦ «Курчатовский институт» – ИРЕА, г. Москва

³Институт археологии Крыма РАН, г. Симферополь

Исследование гребня для волос из плитовой могилы XIV в. на плато Эски-Кермен

The study of a hair comb from a from a 14th-century slab grave on the Eski-Kermen plateau

В работе представлены результаты идентификации материала гребня для волос, обнаруженного в плитовой могиле 7/2020 на плато Эски-Кермен в 2020 г. Для сравнительного анализа регистрировались ИК-спектры материала гребня, а также образцов современного рога крупного рогатого скота и современного самшита. Проведенные исследования показали, что гребень был изготовлен из самшита.

The paper presents the results of identification of the material of the hair comb, found in the slab grave 7/2020 on the Eski-Kermen plateau in 2020. For a comparative study, the IR spectra of samples of the comb, as well as samples of modern horn of cattle and modern boxwood were used. Studies have shown that the comb was made from boxwood.

В 2020 г. экспедицией под руководством А.И. Айбабина и Э.А. Хайрединовой в плитовой могиле 7/2020 некрополя XIV в. перед главной базиликой на плато Эски-Кермен, в погребении ребенка был найден цельный, двусторонний, прямоугольной формы гребень. На одной стороне гребня выпилено 47 крупных зубцов. На противоположной стороне сделано 69 тонких зубцов, плотно прилегающих друг к другу. Центральная часть изделия украшена ажурным декором из расположенных в шахматном порядке круглых сквозных отверстий и растительным декором, нанесенным желтой краской. У основания зубцов прорезано по две тонкие поперечные параллельные линии.

Двусторонние деревянные гребни прямоугольной формы являются универсальными изделиями, бытовавшими с древнейших времен вплоть до Нового времени на широкой территории и у разных народов [AbdAr-Raziq, 1972, p. 405–406]. На протяжении многих столетий у этих предметов сохранялись стандартные размеры и форма. Известно, что в Византии в IX–XI вв. двусторонние гребни прямоугольной формы делали из дерева и слоновой кости. Многочисленные двусторонние прямоугольные деревянные гребни, датированные VI–IX вв., различающиеся пропорциями и декором, находят в Египте [Horak, 1999, p. 67–69, Kat. 52–56; Papanikola-Bakirtzi, 2002, p. 464–465, Cat. 632]. В XIII–XIV вв. в Египте были