УДК 550.8.056

РЕЗУЛЬТАТЫ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАМЯТНИКОВ ЭПОХИ БРОНЗЫ НА ЮЖНОМ УРАЛЕ

Муравьев Л.А., Носкевич В.В., Федорова Н.В. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В настоящей статье приведены результаты геофизического обследования археологических памятников синташтинской культуры эпохи бронзы поселений Ольгино и Журумбай на Южном Урале, проведенные сотрудниками института геофизики УрО РАН в 2006-2008 гг. Выполнено магнитное картирование на территории данных поселений, петромагнитные исследования и построены модели источников ряда аномалий.

Магнитная съемка, археологический памятник, моделирование источников аномалий, магнитная восприимчивость.

MAGNETOMETRIC INVESTIGATIONS RESULTS OF SOUTH URALS' BRONZE AGE ARCHAEOLOGICAL SITES

Muraviev L.A., Noskevich V.V., Fedorova N.V. – The Institute of Geophysics UB of RAS, Yekaterinburg

Abstract. Geophisical investigation results of Sintashta culture archaeological sites Olgino and Zhurumbay, the Bronze Age, carried out in 2006-2008 years, are reported in this article. Magnetometric mapping of these sites territory was carried out, petromagnetic investigations were done, and models of number of anomaly sources were build.

Magnetic survey, archaeological site, anomaly source modeling, magnetic susceptibility.

В настоящее время геофизические методы все более активно используются при археологических исследованиях. Они являются неразрушающими и позволяют при относительно небольших затратах получить достаточно детальную информацию об исследуемом объекте. Одним из методов, применяемых в археологии, является наземная магнитометрия. Современные магнитные съемки отличаются высокой детальностью и производительностью. Это позволяет получать подробные карты аномального магнитного поля за сравнительно непродолжительное время (Муравьев, 2007).

Следует признать, что, несмотря на наличие в арсенале геофизиков высокочувствительных отечественных и импортных магнитометров, за рубежом магнитометрия в археологии применяется более активно, чем в России (Кошелев, 2005; Smekalova, Voss, Smekalov, 2005). Зарубежные исследователи выполняют магнитную съемку в, так называемом, непрерывном режиме, при котором магнитное поле измеряется через дискретные промежутки времени при движении прибора по профилю. Наблюдения проводятся одним магнитометром-градиентометром и, как правило, измеряется только вертикальный градиент магнитной индукции. Полученные результаты съемки используются для выявления и локализации аномалий, которые отождествляются с отдельными объектами – стены и рвы вокруг поселений, остатки построек, печи, очаги, хозяйственные ямы и др. Вместе с тем, количественная интерпретация таких градиентометрических съемок для нахождения геометрических контуров источников аномалий затруднена и обычно не проводится.

Начиная с 2006 г. сотрудники Института геофизики УрО РАН выполняли магнитометрические исследования на территории археологических памятников эпохи бронзы на Южном Урале, относящихся к синташтинской культуре (первая половина II тыс. до н.э.), которые представлены замкнутыми укрепленными поселениями и курганными могильниками (Зданович, Батанина, 2007).

Поселения Каменный Амбар (Ольгино) и Журумбай расположены вдоль реки Карагайлы-Аят в Карталинском районе Челябинской области. В самом начале раскопок выяснилось, что культурный слой сильно насыщен остатками обожженной глины, ко-

торая встречалась как в обломках кирпичей, так и в состоянии крошки. Было установлено, что максимальная ее концентрация фиксировалась вдоль оборонительной стены изнутри и немногим меньше – снаружи, продукты горения прослеживались на склоне и по дну рва.

На начальном этапе исследований на поселении Ольгино проведены оценочные магнитометрические работы непосредственно на раскопах и были выделены аномалии вектора магнитной индукции археологической природы, интенсивность которых достигает 100 нТл. При лабораторных исследованиях физических свойств образцов обожженной глины, взятых из поселения Ольгино, установлено, что значения магнитной восприимчивости изменяются от $280 \cdot 10^{-5}$ до $400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ. Близкие значения магнитной восприимчивости $20\text{-}400 \cdot 10^{-5}$ ед. СИ получены по результатам измерений портативным каппометром на раскопе поселения. Карта магнитной восприимчивости вертикального среза приведена на рис. 1 (цветная вкладка).

Таким образом, контраст в магнитных свойствах отдельных составляющих археологического памятника позволяет уверенно выделять магнитные аномалии от древних археологических построек и провести их интерпретацию.

Магнитометрическая съемка на поселении Ольгино проведена в 2005 г. сотрудником Шеффилдского университета К. Мэрони при помощи градиентометра Geoscan FM18, обладающего разрешением – одна точка на один м^2. Получена карта вертикального градиента магнитной индукции почти всей территории поселения, рис. 2, цветная вкладка (URL: http://www.shef.ac.uk/archaeology/research/siberia/olgino.html). На карте можно выделить общие черты памятника (стены, ров, хозяйственные ямы, очаги, печи) в виде положительных аномалий градиента магнитной индукции.

Детальные магнитометрические исследования на поселении Ольгино проводились нами в 2007 г. с целью выявления и картирования отдельных объектов – остатков жилищ, печей, хозяйственных ям, фортификационных сооружений и других построек в зоне предполагаемого входа внутрь поселения. Область обследования обозначена на рис. 2 белым прямоугольником. Карта аномального магнитного поля приведена на рис. 4 (цветная вкладка).

При магнитометрических работах использовались отечественные магнитометры-градинетометры POS (Сапунов и др., 2000) и канадский градиентометр Scintrex SM-5 (URL: http://www.scintrexltd.com/documents/Scintrex_SM5BrochureNewSwoosh.pdf). Перед проведением магнитной съемки с помощью металлодетектора была проведена очистка участка от техногенного железного мусора, наличие которого могло значительно исказить картину распределения магнитных аномалий от древних объектов. Участки съемки были разбиты на планшеты с размерами 20×20 м. Съемка проводилась по предварительно подготовленной сети наблюдений, при обследовании поселения Ольгино использовалась сеть с шагом 0,5×0,5 м, на поселении Журумбай – 1×1 м.

При использовании непрерывного режима измерений из-за движения датчика происходит осреднение значений за время единичного измерения, кроме того, отсутствует жесткая привязка измерений магнитного поля к точкам пространства и вследствие этого – «размытие» аномального эффекта (Муравьев, 2009). Кроме того, дополнительные погрешности в наблюдения вносит изменение высоты наблюдений при ходьбе с прибором. Поэтому нами применялась другая методика съемки. Измерения производились с полной остановкой датчика прибора над измеряемой точкой. В отличие от измерений в непрерывном режиме несколько увеличивается время выполнения съемки, однако это позволяет уменьшить погрешность измерений. Оцененная нами погрешность съемки составила ±1 нТл. Измерения модуля полного вектора магнитной индукции выполнено на высотах 0,2 м и 2 м от поверхности земли. Магнитометр POS-1 с одним датчиком использовался в режиме непрерывной регистрации вариаций геомагнитного поля

во время наблюдений. Учет вариаций при съемке позволяет получать помимо вертикального градиента индукции магнитного поля и высокоточные измерения абсолютных значений модуля индукции на двух уровнях. Это позволяет увеличить возможности качественной и количественной интерпретации, более надежно выполнить разделение источников магнитных аномалий по глубине их залегания. Затраты труда и времени при двухуровневой съемке лишь ненамного выше, чем для традиционно применяемой в последнее время в археологии технологии непрерывной градиентометрической съемки.

На исследуемых участках выделено два типа аномалий: линейно вытянутые аномалии, предположительно соответствующие фрагментам стен, и интенсивные аномалии изометричной формы. Следует отметить, что магнитные аномалии от жилищ и других следов цивилизации часто имеют правильные геометрические формы. Ряд аномалий, имеющих круговые формы, обнаружены в северной и северо-восточной части поселения Журумбай с внешней стороны от стены со рвом. Для интерпретации выбрана наиболее интенсивная аномалия, поперечник которой составляет ~25 м (рис. 5, цветная вкладка). Такая аномалия может быть создана как археологическим объектом – остатками обожженной глины на месте обжига кирпичей, так и природным источником – обломками сильномагнитной кристаллической породы (Петрофизика, 1992).

В настоящее время трехмерные методы моделирования используют достаточно простые формы элементарных тел (шары, кубы или прямоугольные параллелепипеды), из которых набирается модель источников. Это делает трудоемким построение альтернативных вариантов эквивалентных источников. Поэтому по профилю, проходящему через эпицентр аномалии, проведена интерпретация двумерным методом, основанным на теории эквивалентных решений обратных задач теории потенциала. Метод разработан в Институте геофизики УрО РАН и позволяет одновременно проводить моделирование источников аномалий как для класса ограниченных объектов, так и для границ раздела слоистых сред (Цирульский, Никонова, Федорова, 1980).

Идея использовать при решении обратных задач теории потенциала такие модельные источники, для которых легко построить эквивалентные объекты, была высказана А.В. Цирульским в 1974 г. (Цирульский, 1974). Затем им совместно с Ф.И. Никоновой разработаны основы метода интерпретации аномалий для класса ограниченных областей (Цирульский, Никонова, 1975) и совместно с Н.В. Федоровой – для класса границ раздела горизонтально слоистых сред (Федорова, Цирульский, 1978).

Метод основан на фундаментальных результатах теории эквивалентных решений обратных задач потенциала. В двухмерном варианте метода аномальное магнитное поле аппроксимируют полем набора сингулярных двумерных пластин, а затем производится построение геометрических контуров эквивалентных источников при различных значениях намагниченности. Использование таких модельных источников позволяет достаточно устойчиво разделять поля от разных объектов и определять интегральные характеристики источников, такие, как магнитный момент, центр тяжести и направление падения источника. Принимая во внимание принципиальную неоднозначность обратных задач магнитометрии, интерпретатор для каждого модельного источника может быстро рассчитать геометрические контуры ограниченных объектов или контактные поверхности слоистой среды для различных значений намагниченности. Это позволяет оперативно конструировать и анализировать альтернативные варианты разреза, эквивалентные по создаваемому внешнему полю, что особенно важно при интерпретации геофизических полей в условиях недостатка априорной геологической и петрофизической информации.

Интерпретация аномального магнитного поля состоит из двух этапов. На первом этапе аномалии Z_a или T_a аппроксимируют

суммарным полем N сингулярных пластин, каждая из которых характеризуется постоянной линейной намагниченностью $A_к$ и координатами концов $a_к$ и $b_к$. Комплексный потенциал пластины в точке $z=x+iy$ записывается формулой:

$$V(z)=A_k\,[ln\,(z-a_k\,)-ln\,(z-b_k)].$$

Задача аппроксимации состоит в нахождении такого набора параметров N, A_1, a_1, $в_1$,... A_N, a_N, $в_N$, при котором максимальное значение разности между значениями аномального и модельного полей в точках наблюдений не превышает некоторой величины E. Значение E достаточно мало и задается из условий решаемой задачи и погрешности наблюдений.

При интерпретации аномалий модуля вектора магнитной индукции $\boldsymbol{T}$ используются соответствующие составляющие вторых производных потенциала:

$$Z_a = \frac{1}{\pi} V_{yy}(x, y),$$

$$\frac{1}{\pi} V_{yy}(x, y) = \mathrm{Im}\{\sum_{k=1}^{N} A_k [\frac{1}{z-a_k}) - \frac{1}{z-b_k}]\},$$

$$H_a = \frac{1}{\pi} V_{xy}(x, y),$$

$$\frac{1}{\pi} V_{xy}(x, y) = \mathrm{Re}\{\sum_{k=1}^{N} A_k [\frac{1}{z-a_k}) - \frac{1}{z-b_k}]\},$$

$$T_a = \sqrt{(Z_N + Z_a)^2 + (H_N + H_a)^2} - T_N,$$

где Z_a, H_a, – вертикальная и горизонтальная составляющие вектора магнитной индукции от аномального источника, Z_N, H_N, – вертикальная и горизонтальная составляющие нормального вектора магнитной индукции, а T_N – его модуль.

На втором этапе производятся расчеты геометрии эквивалентных источников. Для пластин отстраивается эквивалентное семейство ограниченных областей или границ раздела – в зависимости от той информации, которая имеется по рассматриваемому району. Возможны варианты объединения наиболее близких пластин в один источник. При этом сохраняется возможность анализа всего множества эквивалентных решений. Переход от одного варианта геомагнитного разреза к другому не требует повторения первого этапа интерпретации, т.е. собственно подбора. Вычисление формы эквивалентных источников на современных компьютерах производится очень быстро. Геометрия источников, эквивалентных одной сингулярной пластине, изменяется от тонкого пласта до эллипсоидальных фигур и при низких значениях намагниченности форма тела становится близкой к окружности. При использовании двух сингулярных источников можно моделировать более сложные и разнообразные по геометрии объекты. При изучении строения горизонтально слоистых сред для каждого сингулярного источника можно построить эквивалентное семейство границ раздела. В таких случаях при вычислениях геометрии эквивалентных контактных границ в задачах магнитометрии варьируют три параметра: скачок намагниченности, направление вектора намагниченности и глубину до асимптоты (Федорова, Цирульский, 1978).

Следует отметить, что, хотя обоснование метода дано для двумерного случая, на практике исследуют трехмерные аномалии. Результаты изучения погрешности нахождения источников на теоретических моделях показали, что, если соотношение между длиной и шириной аномалии К=2, ошибка нахождения центра источника составляет 15%, а в случае К=3 погрешность снижается до 5-8%. Поскольку интересующие нас археологические объекты расположены неглубоко (0,3-1 м), погрешности при нахождении параметров источников аномалий будут незначительно влиять на результаты исследований. При этом интерпретатору предоставляется возможность быстро рассмотреть эквивалентные варианты, что несомненно является важным для определении природы аномалий, разделения источников искусственного или природного происхождения.

При интерпретации описанным выше методом магнитной аномалии поселения Журумбай, в результате аппроксимации найдены параметры двух близко расположенных источников, центры которых нахо-

дятся на глубине ~10 м (рис. 5а, цветная вкладка). Эквивалентные им тела построены для значений намагниченности 1, 2 и 3 А/м. При намагниченности 1 А/м поперечники округлых блоков составляют ~10 и ~8 м, расположены на глубинах от 5 до15 м. Блок, расположенный справа, имеет несколько большие размеры, чем левый блок. Такое распределение магнитных масс можно качественно оценить по графику вертикального градиента dT_a/dh, поскольку максимум кривой градиента смещен вправо относительно максимума графиков T_a. Блоки касаются друг друга и возможно, что представляют единый глубинный массив. При намагниченности 2 А/м глубина до верхней кромки объектов увеличится до ~6,5 м и до ~8 м – при намагниченности 3 А/м. Для того, чтобы оценить возможность создания этой аномалии остатками обожженной глины на месте обжига кирпичей, рассчитаны также варианты эквивалентных источников в виде границы раздела намагниченного верхнего слоя, расположенного вблизи поверхности земли. Построение таких моделей оказалось возможно выполнить лишь для больших значений намагниченности, более 0,7 А/м.

На разрезе приведены эквивалентные границы раздела для намагниченности 0,7 и 1 А/м, при этом мощность намагниченного слоя в эпицентральной зоне аномалии достигает ~3 и ~5 м, соответственно. По результатам петрофизических исследований намагниченность обожженной глины на порядок меньше. Следовательно, источником аномалии являются более глубокие объекты, скорее всего, геологической природы.

Таким образом, в результате интерпретации в первом варианте получено, что источник аномалии – тело сферической формы, имеющее поперечник в несколько метров, центр которого расположен на глубине порядка десяти метров. Во втором варианте получены близкие значения глубины залегания центров источников, при этом уточнена форма объекта, построены варианты распределения намагниченности по разрезу и выполнена оценка глубины залегания верхних кромок. По-видимому, источник аномалии может соответствовать ксенолитам сильномагнитного серпентинита (3-5 А/м) среди вмещающих гранитов, магнитная восприимчивость которых значительно ниже. Отметим, что в непосредственной близости от места исследования имеется контакт гранитного массива с серпентинитами.

Интерпретация методом Цирульского была проведена по профилю, пересекающему линейно вытянутую аномалию, обнаруженную над оборонительной стеной поселения Ольгино. Полученные в результате автоматизированного подбора намагниченные пластины залегают сравнительно неглубоко, 0,2-0,6 м (рис. 6б, цветная вкладка). Их верхние грани сходятся в одном месте и расположены очень близко к поверхности земли. Расстояние между нижними концами источников около 3,5 м. Результаты расчетов показывают, что для того чтобы контуры эквивалентных источников не выходили за пределы земной поверхности, намагниченность источников должна быть достаточно большой, больше чем 0,5 А/м. Такие значения намагниченности на порядок превосходят магнитные свойства обожженной глины и им могут соответствовать только кристаллические породы (Петрофизика, 1992).

Результаты интерпретации подтверждены последующими раскопками 2008 г. на поселении Ольгино. Обводная стена шириной по основанию 4-5 м сложена из почвенных и глиняных блоков (рис. 6, цветная вкладка). Снаружи она облицована плитами гранита и амфиболита, места добычи которых выявлены геологами вблизи поселения.

В заключение работы еще раз отметим, что при исследовании археологических объектов современные методы магнитных исследований позволяют не только закартировать и локализовать аномалии от древних скрытых под землей следов жизнедеятельности древних цивилизаций, но также в результате применения мощного аппарата количественной интерпретации магнитных аномалий, разра-

ботанного для геофизических исследований, значительно пополнять знания о строении этих исторических источников. По результатам интерпретации магнитных аномалий на поселении Журумбай с большой долей вероятности можно заключить, что источник аномалии имеет геологическую природу (ксенолиты серпентинита в гранитах). При моделировании источников аномалии поселении Ольгино установлено, что для укрепления оборонительной стены использованы плиты из кристаллических пород.

Литература

Зданович Г.Б., Батанина И.М. Аркаим – «Страна городов». «Крокус», «Южно-Уральское книжное издательство», Челябинск. 2007. 260 с.

Кошелев И.Н. Магнитная разведка археологических памятников. Киев, 2005. 313 с.

Муравьев Л.А. Возможности высокочувствительных магнитометров POS при проведении геомагнитных съемок. Уральский геофизический вестник. 2007. № 1 (10). С. 56-60.

Муравьев Л.А. Некоторые особенности непрерывного режима наземной магнитной съемки // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: мат-лы XXXVI сессии Межд. семинара / Казан. гос. ун-т. Казань, 2009. С. 240-241.

Петрофизика. Справочник. Т.1. Горные породы и полезные ископаемые. / Под ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1992. 391с.

Сапунов В.А., Савельев Д.В., Денисова О.В., Киселев С.Е., Денисов А.Ю., Сабанин А.А. Современные протонные оверхаузеровские магнитометры: возможности и перспективы в области геологоразведки // Геологической службе России 300 лет: тез. докл. Межд. геофиз. конф. С.-Петербург, 2000. С. 290-292.

Федорова Н.В., Цирульский А.В. Об обратной задаче для контактной поверхности // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1978. № 3. С. 38-41.

Цирульский А.В. О решении прямой и обратной задачи гравиразведки // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1974. № 7. С. 84-90.

Цирульский А.В., Никонова Ф.И. О разрешимости обратной задачи логарифмического потенциала в конечном виде // Изв. АН СССР, Физика Земли, 1975. № 5. С. 37 -47

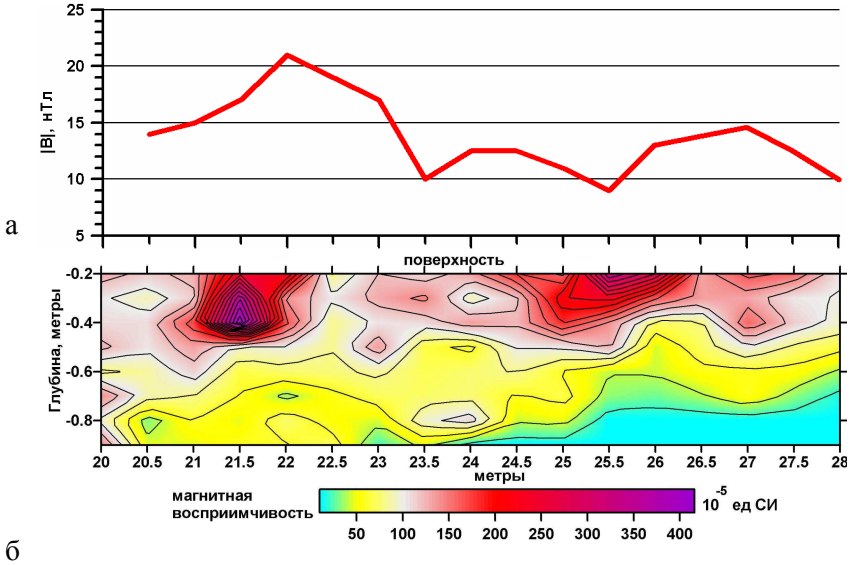
Цирульский А.В., Никонова Ф.И., Федорова Н.В. Метод интерпретации гравитационных и магнитных аномалий с построением эквивалентных семейств решений. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. 135 с.

Merrony C. Investigating the Bronze Age of Southern Siberia. URL: http://www.shef.ac.uk/archaeology/research/siberia/olgino.html

Scintrex SM-5 NAVMAG specifications // Canada, Scintrex 2007. (URL: http://www.scintrexltd.com/documents/ Scintrex_SM5BrochureNewSwoosh.pdf

Smekalova T.N., Voss O., Smekalov S.L. Magnetic survey in archaeology. 10 years of using of Overhauser GSM-19 gradiomenter. SPb.: Publishing house of Polytechnic University. 2005. 68 p.

К статье Муравьева Л.А. и др. «Результаты магнитометрических исследований ...»



а

б

в

Рис. 1. Измерение магнитной восприимчивости по вертикальной стенке раскопа: а – график аномального магнитного поля над стенкой, б – карта распределения магнитной восприимчивости по вертикальной стенке, в – размещение прибора в процессе измерения; расположение профиля показано на рис. 4а черной линией

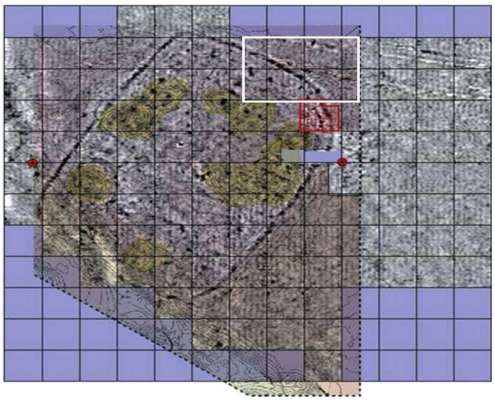


Рис. 2. Карта вертикального градиента магнитной индукции над поселением Ольгино (Merrony, 2005 г.); белым прямоугольником показана площадь магнитной съемки 2007 г., красным– обозначен археологический раскоп

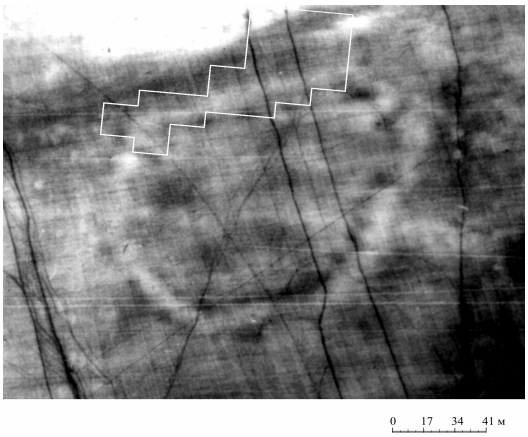
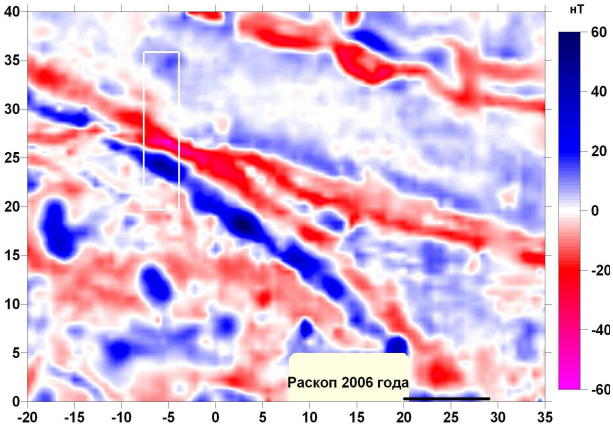
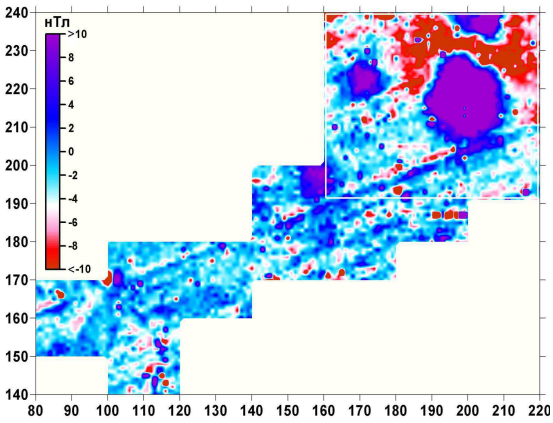


Рис. 3. Фрагмент аэрофотоснимка 1978 г.: укрепленное поселение Журумбай (Зданович, Батанина, 2007); белым обозначена площадь магнитной съемки 2008 г.



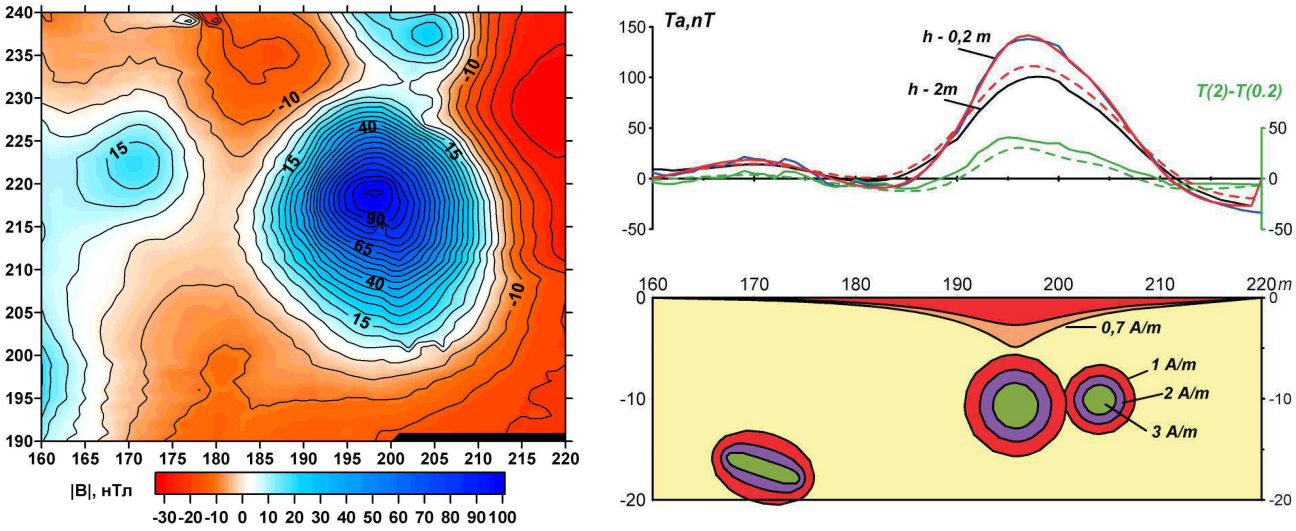
а



б

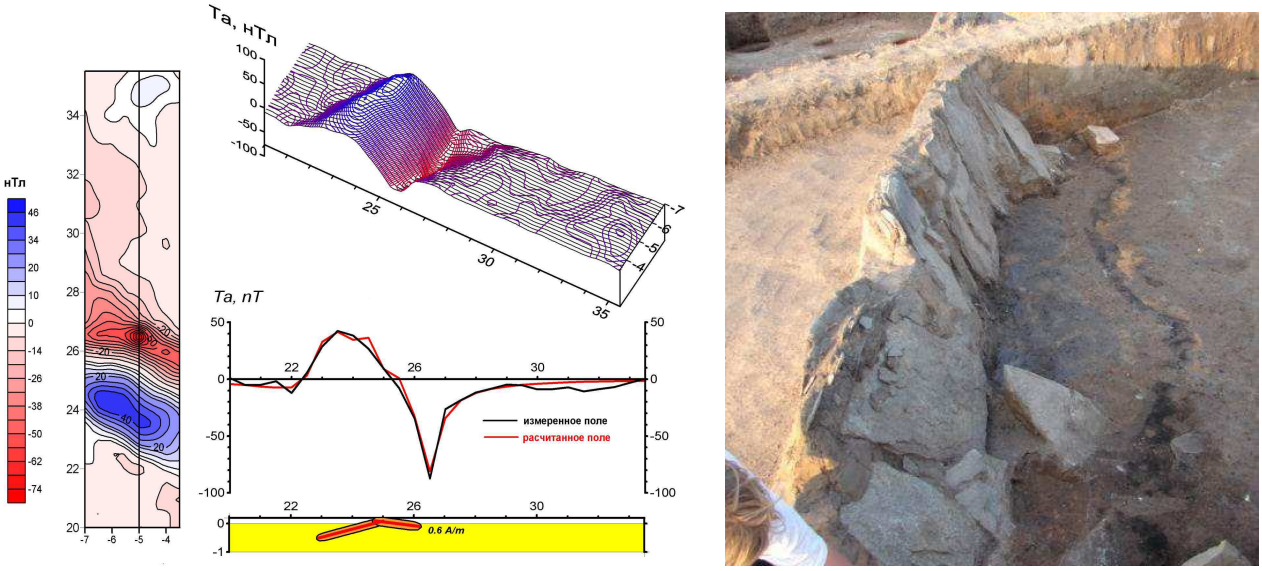
Рис 4. Карты аномального магнитного поля поселений: а – Ольгино, б – Журумбай; обозначения осей – метры; белыми прямоугольниками обозначены аномалии, выбранные для интерпретации

К статье Муравьева Л.А. и др. «Результаты магнитометрических исследований ...»



а б

Рис. 5. Результаты исследования магнитной аномалии на поселении Журумбай:
а – фрагмент карты аномалий T_a, высота измерения 0,2 м, изолинии проведены через 5 нТл;
б – результаты интерпретации по профилю, пересекающему эпицентр аномалии; в нижней части рисунка на разрезе приведены контуры эквивалентных источников для различных значений намагниченности. Обозначения: сплошные линии – результаты наблюдений T_a для высоты наблюдений 0,2 м и 2 м, и вертикального градиента dT_a/dh; пунктирные линии – соответствующие графики T_a от модельных источников



а б в

Рис. 6. Результаты исследования магнитной аномалии над обводной стеной поселения Ольгино: а – фрагмент карты аномалий T_a, изолинии проведены через 4 нТл; б – результаты интерпретации по профилю, пересекающему аномалию, модельное тело и графики рассчитанного и измеренного магнитных полей для высоты наблюдений 0,2 м; в – фотография раскопа фрагмента обводной стены