РОССИЙСКАЯ АРХЕОЛОГИЯ, 2019, № 3, с. 75–91

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В АРХЕОЛОГИИ

МАГНИТОМЕТРИЯ В АРХЕОЛОГИИ – ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ[1]

© 2019 г. Й.В.Е. Фассбиндер

Мюнхенский университет им. Людвига и Максимилиана, Федеративная Республика Германия

E-mail: fassbinder@geophysik.uni-muenchen.de

Поступила в редакцию 14.02.2019 г.

Впервые магнитное обследование в археологии было применено в 1956 г., и за прошедшие десятилетия оно стало одним из ведущих археологических методов выявления и картографирования погребенных структур на крупных археологических памятниках. Магнитные методы распознавания объектов весьма чувствительны в описании характера и определении оксидов железа, гораздо в большей степени, чем любые методы химического анализа. Исходя из этого, благодаря получению полной информации о природе магнитных особенностей многие детали почвенных слоев и погребенных археологических структур могут быть обнаружены, визуализированы и интерпретированы лишь с помощью “магнитного ока”. Полная археологическая интерпретация, предваряющая археологические раскопки, должна содержать всю доступную информацию об археологических особенностях памятника, а также о находках подъемного материала. В то же время многие весьма важные детали могут быть получены с помощью комплексного анализа магнитных свойств почвы, но при этом возникают и новые вопросы археологической интерпретации результатов геофизического обследования. Статья посвящена описанию основ магнитометрического метода, особое внимание уделяется разным видам намагниченности археологических объектов и особенностям их интерпретации.

Ключевые слова: магнитометрия, полевые магнитометры, почвенный магнетизм, археологическая интерпретация.

DOI: 10.31857/S086960630005672-8

Впервые магнитное обследование в археологии было применено в 1956 г. (Belshé, 1957; Aitken, 1958), и за прошедшие десятилетия оно стало одним из ведущих археологических методов выявления и картографирования погребенных структур на крупных археологических памятниках (Aitken, 1974; Scollar et al., 1990; Clark, 1996; Neubauer et al., 1998–1999; Benech, 2005; David et al., 2008). Магнитные методы распознавания объектов весьма чувствительны в описании характера и определении оксидов железа, гораздо в большей степени, чем любые методы химического анализа. Исходя из этого, благодаря получению полной информации о природе магнитных особенностей многие детали почвенных слоев и погребенных археологических структур могут быть обнаружены, визуализированы и интерпретированы лишь с помощью “магнитного ока” (Schleifer et al., 2003; Fröhlich et al., 2003; Schleifer, 2004). Полная археологическая интерпретация, предваряющая археологические раскопки, должна содержать всю доступную информацию об археологических особенностях памятника, а также о находках подъемного материала. В то же время многие весьма важные детали могут быть получены с помощью комплексного анализа магнитных свойств почвы, но при этом возникают и новые вопросы археологической интерпретации результатов геофизического обследования. Долгое время археологи были твердо убеждены, что результаты геофизического обследования сами по себе могут иметь лишь ограниченное применение в решении археологических задач. Сегодня же стало общим местом, что организация новых современных археологических раскопок нуждается в предварительном геофизическом обследовании разными способами (Schmidt, 2002; Fassbinder, 2007; Aspinal et al., 2008; Fassbinder, 2015).

Широкое распространение магнитного обследования в целом обязано тому факту, что практически любой тип почвы на планете демонстрирует содержание магнитных минералов,

[1] Перевод Д.С. Коробова.

таких как маггемит и магнетит, в своих верхних слоях (Le Borgne, 1955; 1960). За исключением чрезвычайно редких случаев, относящихся в основном к памятникам с высоким уровнем грунтовых вод и состоящим из мокрых почвенных слоев, не имеется геологических факторов, лимитирующих применение магнитного обследования. Обогащение данными минералами археологических культурных слоев – особенно в местах воздействия огня, но также в заполнении рвов, хозяйственных или столбовых ям – вызывается путем формирования их за счет естественного или антропогенного обжига, разнообразных почвообразующих процессов (Taylor et al., 1987), а также присутствия почвенных бактерий, чувствительных к магнитному полю (Fassbinder et al., 1990; Stanjek et al., 1994). Использование огня все же играет ключевую роль в насыщении почвы магнитными минералами, поскольку это имеет место практически на всех археологических памятниках с эпохи палеолита по настоящее время.

Магнитометры. Существует широкий спектр доступных, но весьма разных инструментов для измерения магнитного поля Земли (Lenz, 1990), однако для специального использования при археологическом обследовании требуется прочный и одновременно чувствительный прибор, которым можно было бы легко и быстро оперировать в полевых условиях (Becker, 1995; 1997; Gaffney et al., 2000).

Процесс магнитометрической съемки предполагает установление разметки на исследуемой площади в виде сетки квадратов размерами 20 × 20 м, 40 × 40 м или другими и затем проведение исследования путем измерения магнитного поля в определенных интервалах, например 25 × 25 см или 25 × 50 см. Измерение по сетке требует движения вдоль размеченных профилей. Магнитометрические датчики могут переноситься вручную или на колесном устройстве на высоте около 30 см над поверхностью. С использованием комплексов, снабженных системами глобального спутникового позиционирования (GPS), стало возможным исключить необходимость движения вдоль полевой разметки, однако измерения по-прежнему требуют перемещения по прямым линиям с устройством профилей через 25 см для гарантированной приемлемой точности.

В основном, магнитометры делятся на векторные и скалярные. Векторные магнитометры измеряют напряженность лишь одной составляющей магнитного поля (X, Y или Z), тогда как скалярными магнитометрами меряют полную составляющую магнитного поля (F) более или менее независимо от ориентации датчика.

Суточные изменения магнитного поля Земли иногда бывают того же диапазона, что и магнитные аномалии, вызванные погребенными археологическими объектами. Эти суточные нарушения могут быть автоматически аннулированы при использовании векторных магнитометров, если они устроены в виде градиентометров и могут управляться в поле лишь в такой форме – когда устройство измеряет градиент Z-составляющей магнитного поля Земли (определяется двумя индукционными датчиками, механически закрепленными на одном устройстве). Теоретически и в лабораторных условиях можно сконструировать прибор с любым произвольным расстоянием между датчиками, но на практике трудно соорудить механически стабильный инструмент, состоящий из немагнитных материалов. Доступные на рынке коммерческие индукционные магнитометры имеют градиент в 50–100 см. Скалярные магнитометры более или менее независимы от наклона датчиков и могут применяться в качестве дифференциальных или вариометрических систем, когда устройство измеряет разницу магнитного поля между двумя позициями на поверхности с помощью примыкающих датчиков и таким образом с градиентом более 5 см. В противном случае полученные данные нуждаются в комплексной обработке для удаления эффекта имеющихся дневных вариаций магнитного поля.

Решение в пользу тех или иных конкретных магнитометрических систем должно быть внимательно продумано с точки зрения достоинств и недостатков каждой из них, а это зависит во многом от конкретной ситуации и специфических целей обследования. Векторные магнитометры, которые сконструированы для измерения вертикальной Z-составляющей, достаточно нечувствительны к нарушениям горизонтальных X- и Y-компонент. Следовательно, подобные инструменты могут лучше использоваться вблизи транспортных средств или возле технических сооружений (таких как металлические конструкции, кирпичные мосты и пр.), которые могут нарушать измерение вариаций магнитного поля под земной

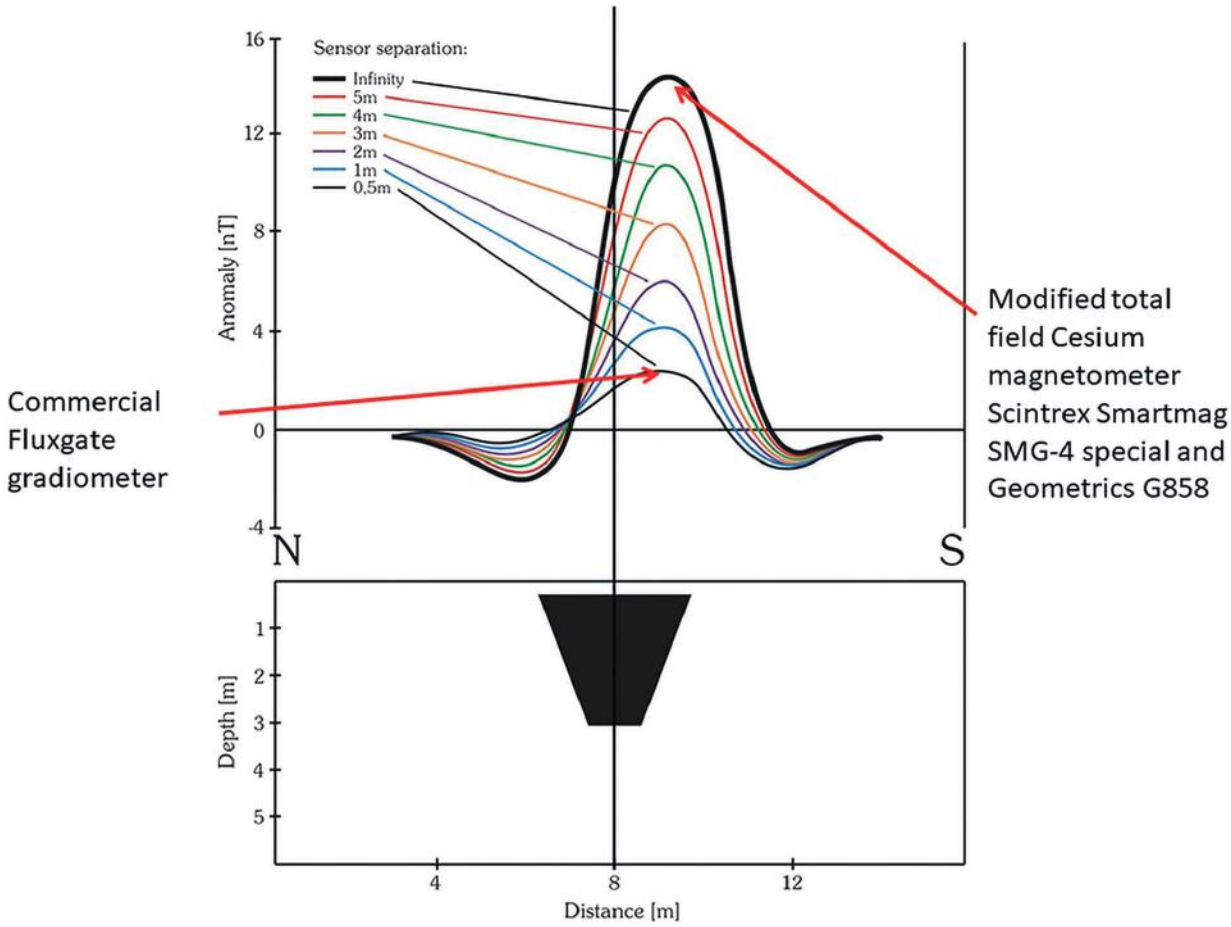

Рис. 1. Зависимость интенсивности магнитной аномалии над V-образной канавой (глубиной около 2.75 м и шириной 3.5 м в верхней части) от конфигурации датчика/зонда магнитометра, рассчитанной для наклона магнитного поля Земли 60° в Северном полушарии.

Fig. 1. The dependence of the magnetic anomaly intensity over a V-shaped ditch (about 2.75 m deep and 3.5 m wide in the upper part) on the configuration of the magnetometer sensor/probe, calculated for the slope of the Earth's magnetic field of 60° in the northern hemisphere

поверхностью. С другой стороны, чувствительность таких инструментов ограничена другими факторами, а именно необходимостью использовать градиентометрические системы. Несмотря на то что SQUID-магнитометры[2] являются физически наиболее чувствительными приборами (чувствительность тензорной составляющей ±1 фемтотесла или 10^{-15} Тл), на практике, как и другие векторные магнитометры, они могут делать измерения лишь в градиометрическом режиме (Chwala et al., 2001; Schultze et al., 2007). В то время как индукционные магнитометры проводят измерения с разрешением в 50–100 см, SQUID-магнитометры имеют ограничение в разрешении датчиков по разным физическим причинам до 4 см.

Современные полевые инструменты по измерению общего магнитного поля, такие как протонные и оверхаузеровские магнитометры, или щелочно-паровой прибор с оптической накачкой, такой как цезиевый магнитометр, имеют чувствительность в ±0.1 пикотеслы (10^{-12} Тл), но могут проводить измерения в качестве "вариометра" или "двухдатчиковой" конфигурации и таким образом достигать общей чувствительности, сопоставимой со SQUID-магнитометрами (Lenz, 1990; Becker, 1995; 1997). В подобной дифференциальной конфигурации эталонный датчик настроен практически до бесконечности, и таким образом все магнитные аномалии могут быть зафиксированы с их максимальной

[2] SQUID – superconducting quantum interference devices: сверхпроводящие квантовые интерференционные устройства.

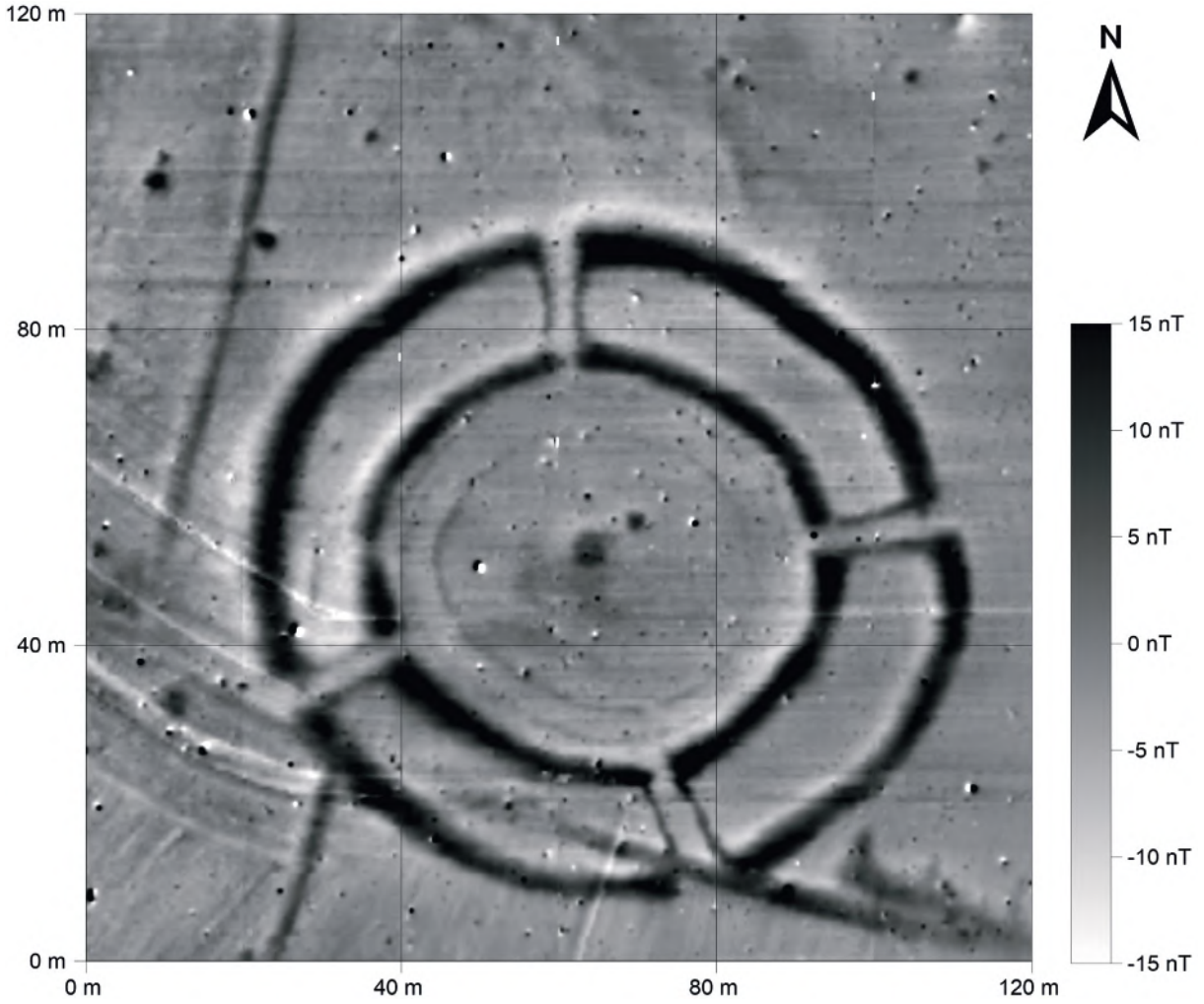

Рис. 2. Штейнабрунн, Австрия. Магнитограмма неолитической кольцевой структуры. Ров заполнен верхним слоем почвы, но частокол и ямы в центре ограждения также проявляются как нормальная положительная (черная) аномалия.

Fig. 2. Steinabrunn, Austria. A magnetogram of the neolithic ring structure

интенсивностью (рис. 1). Преимущество этой системы заключается в том, что итоговое изображение дает больше информации на значительной глубине (около 1–3 м), тогда как результаты измерений индукционным градиентометром демонстрируют археологические структуры более четко, но они могут быть ограничены первым метром глубины от поверхности за счет градиентной конфигурации в 50–60 см. С другой стороны, изображение, получаемое с помощью скалярного магнитометра, может быть весьма значительно “зашумлено” геологическими структурами и близко расположенными техническими объектами и/или даже небольшим количеством современного металлического мусора.

Цифровая обработка изображения геофизических данных представляет собой ключевой элемент археологического обследования и важнейший шаг к тому, чтобы сделать результаты проведенного исследования понятными как для геофизиков, так и для археологов. Потенциал для цифровой обработки изображений геофизических данных по сравнению с изолинейными схемами (“контурными” линиями, объединяющими пространство со схожими значениями магнитной интенсивности) был понят и применен весьма давно – в самом начале геофизического обследования в археологии (Scollar, Krückeberg, 1966). В настоящее время стали доступными достаточно сложные компьютерные программы, позволяющие работать с данными при помощи

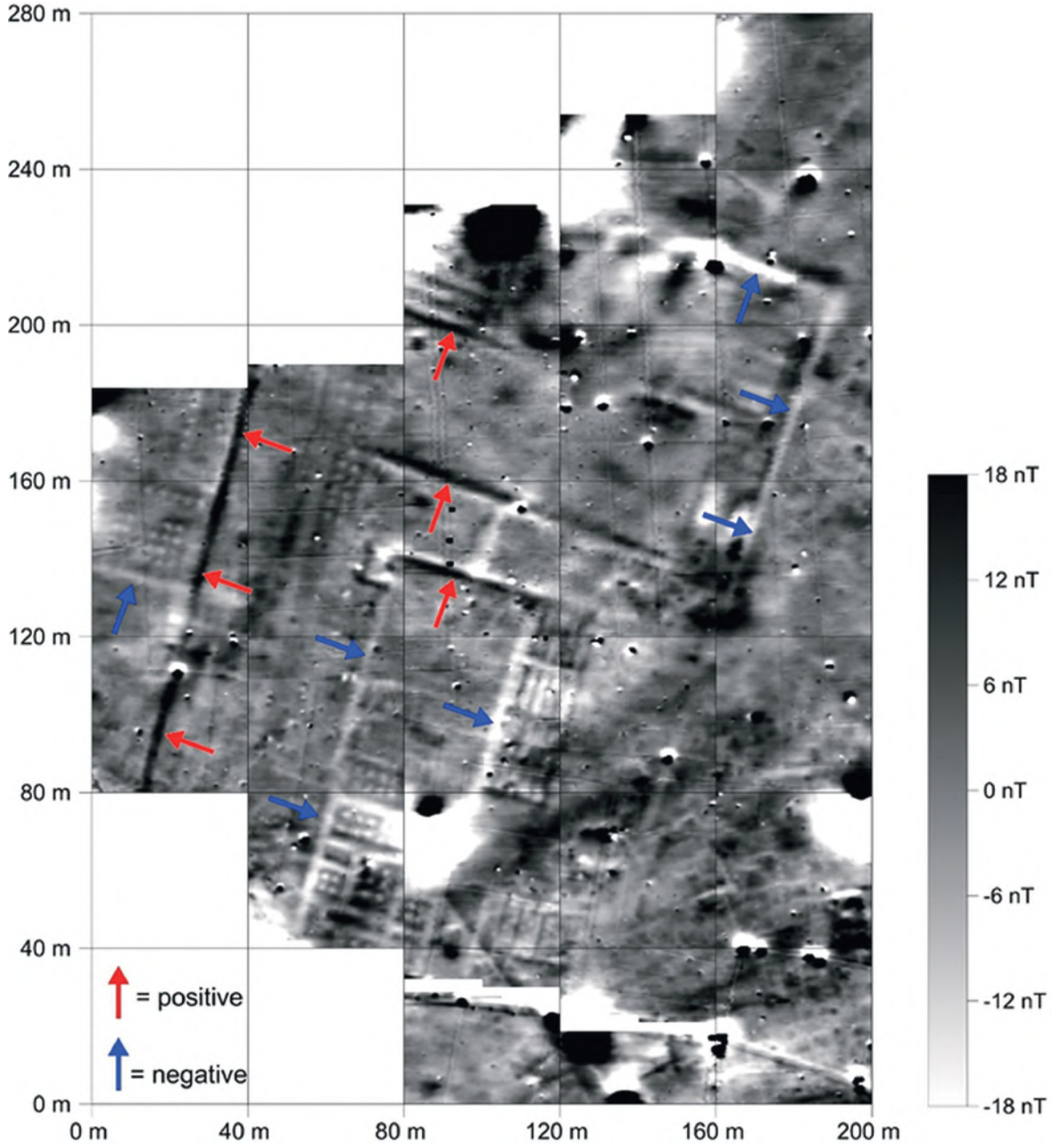

Рис. 3. Кантир, Египет. Дворец Рамзеса II. Стены из сырцового кирпича изготовлены из материала различной магнитной восприимчивости и проявляются в одних областях как положительная (черная) аномалия, а в других – как отрицательная (белая) аномалия. Основания каменных колонн из песка и известняка всегда демонстрируют отрицательную (белую) аномалию.

Fig. 3. Qantir, Egypt. The palace of Ramses II

множества корректирующих и обрабатывающих процедур, соответствующих требованиям различных инструментов, используемых в археологическом обследовании (Schmidt, 2002; David et al., 2008).

Исследуемая площадь должна измеряться в интервале как минимум 25 × 50 см и даже менее – 25 × 25 см. Магнитометрические данные (относительная интенсивность в зависимости от положения по координатам X-Y) затем переводятся в оттенки серого цвета, отображенные на экране компьютера, которые могут быть экспортированы и сохранены в виде файла изображений формата .TIFF. Есть две основные причины работы именно с изображениями в оттенках серого цвета: 1) интенсивность магнитного поля является набором данных с одним

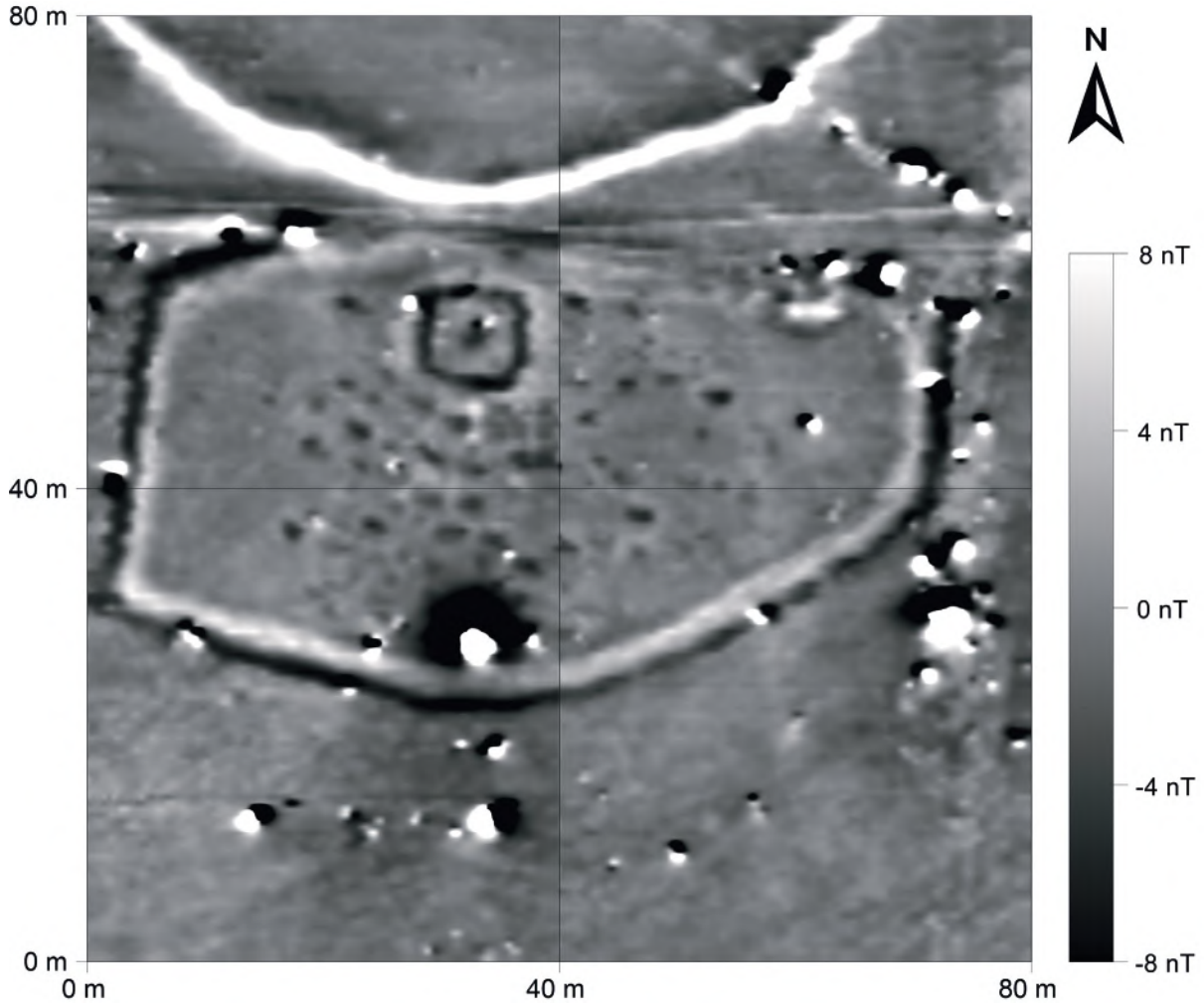

Рис. 4. Байкара, Казахстан. Магнитограмма исламского кладбища, прилегающего к скифскому кургану. Серое затененное изображение было инвертировано и показывает отрицательные аномалии в черном цвете; одиночные могилы внутри овала проявляются как отрицательные (черные) аномалии.

Fig. 4. Baykar, Kazakhstan. A magnetogram of the Islamic cemetery adjacent to the Scythian mound

параметром, поэтому единственное физически разумное отображение таких данных – использование шкалы с одним параметром; 2) человеческий глаз способен различить до 1000 оттенков серого цвета. Таким образом, отображение магнитометрических данных в графической передаче из 256 оттенков серого цвета (от белого до черного) является вполне успешным инструментом анализа результатов этого метода. Популярным термином для обозначения итогового изображения магнитометрических данных является “магнитограмма”, хотя это понятие используется в геомагнетизме также для описания вариаций магнитного поля Земли во времени.

Почвенный магнетизм. Небольшой масштаб или локальные отклонения в интенсивности и/или направлении нормального магнитного поля Земли легко приводят к магнитному контрасту между погребенными археологическими объектами и прилегающими к ним почвами и отложениями; эти вариации дают возможность магнитометрам обнаруживать археологические памятники под земной поверхностью. Насыщенность пахотного слоя ферримагнитными минералами характерна практически для любой почвы на планете (Le Borgne, 1955; Mullins, 1977; Fassbinder, Stanjek, 1993). Она наблюдается даже в весьма намагниченных почвах вулканического происхождения (Tucker, 1952; Fassbinder et al., 2009).

Насыщение и приведение этих тяжелых ферримагнитных минералов к форме магнитных структур может происходить механически за счет воды или ветра (Fassbinder et al., 2005), так же как за счет почвообразующих

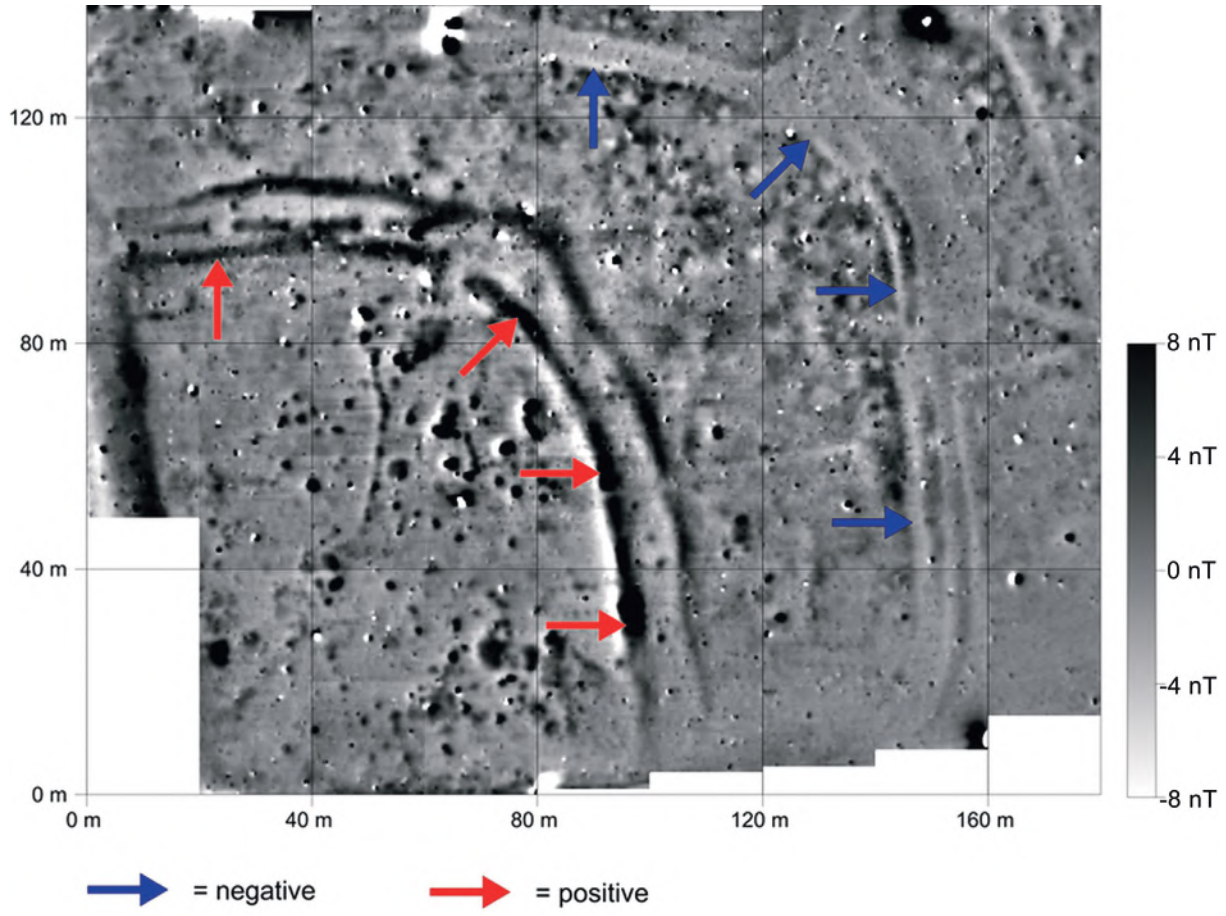

Рис. 5. Рикофен, Бавария. Неолитический участок окружен четырьмя концентрическими рвами; два внутренних круга отображаются как положительный след (черный), а два внешних рва – как отрицательный (белый).

Fig. 5. Riekofen, Bavaria. A neolithic site surrounded by four concentric ditches

процессов, но наиболее часто это происходит в процессе разогрева почв из-за природных пожаров либо, более интенсивно, при использовании огня людьми в ограниченном пространстве. Возникшие однажды в верхнем горизонте, эти минералы оседают во рвах, ямах, частоколах или столбовых конструкциях, и они будут производить магнитные аномалии, которые могут улавливаться с помощью приборов над земной поверхностью.

Индуцированная намагниченность. Если ферромагнитный образец подвергается действию магнитного поля, намагниченность J_i будет в таком образце индуцирована. Магнитометрические измерения в приложенном поле (в диапазоне магнитного поля Земли) предоставляют информацию о природе и количестве магнитных минералов и, следовательно, могут отслеживать изменения, которые происходят в образце в результате нагревания. Примеры археологических памятников, на которых итоговые магнитные аномалии могут быть объяснены за счет индуцированной намагниченности структур, относятся к дельте Нила (Becker, Fassbinder, 1999) и к гончарному центру возле Регенсбурга в Баварии (Fassbinder et al., 2011) (см. ниже, рис. 3 и 7). Понимание происхождения и формирования оксидов железа в почве и специфических значений магнитной восприимчивости рассматриваемых минералов и железа позволяют улучшить спецификацию и анализ и, следовательно, лучше и более подробно интерпретировать интенсивность магнитной аномалии.

Вместе с индуцированной намагниченностью, в силу формирования и обогащения мелкозернистых магнитных частиц, остаточная намагниченность археологических структур и объектов также играет значительную роль в возникновении магнитных аномалий (см. ниже).

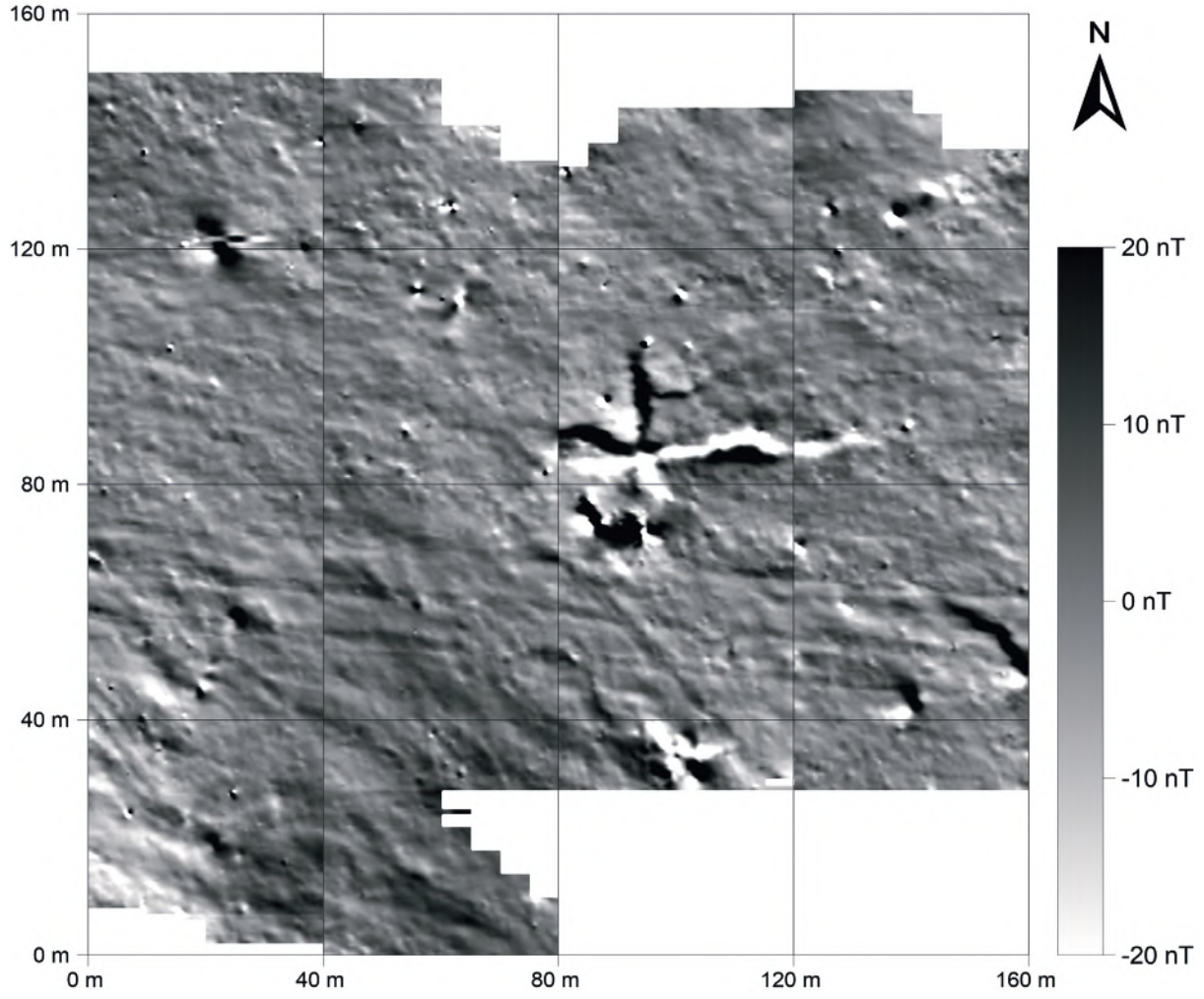

Рис. 6. Релох Соляр, Перу. Типичная звездообразная магнитная аномалия от удара молнии по трапециевидному геоглифу.

Fig. 6. Reloj Solar, Peru. A typical star-shaped magnetic anomaly from a lightning strike at a trapezoidal geoglyph

Не всегда бывает понятным четкое соотношение между аномалией и погребенной археологической структурой (телом) – обычно потому, что материал, вызывающий аномалию, остается неизвестен без проведения археологических раскопок. Интерпретация аномалии зависит от того, индуцируется ли намагниченность только существующим магнитным полем Земли (и, следовательно, параллельно текущему направлению поля) или является в основном остаточным (постоянным) и выровненным, например, с древним магнитным полем. К примеру, древняя намагниченность может отклоняться на некоторый угол от направления современного магнитного поля, если скрытая структура была намагничена на месте в ходе горения или нагрева (т.е. TPM, или термомагнитной намагниченности). Таким образом, важным параметром является коэффициент остаточной намагниченности Кёнигсбергера[3] (Qn), который может помочь в археологической интерпретации результатов. В то время как остаточная и индуцированная намагниченность для археологических почв находится в диапазоне Qn ~ 1, в обожженных кирпичах и нагретых почвах она может достигать значений >10 (очень сильно зависит от размера зерна магнитных минералов); в местах, пораженных молнией, Qn может достигать значений до 500–700 (см. ниже, рис. 6).

Остаточная намагниченность в археологических структурах. Практически каждая скальная

[3] Коэффициент Кёнигсбергера – величина, характеризующая магнитные свойства объекта и определяемая как отношение остаточной естественной намагниченности образца к индуцированной намагниченности.

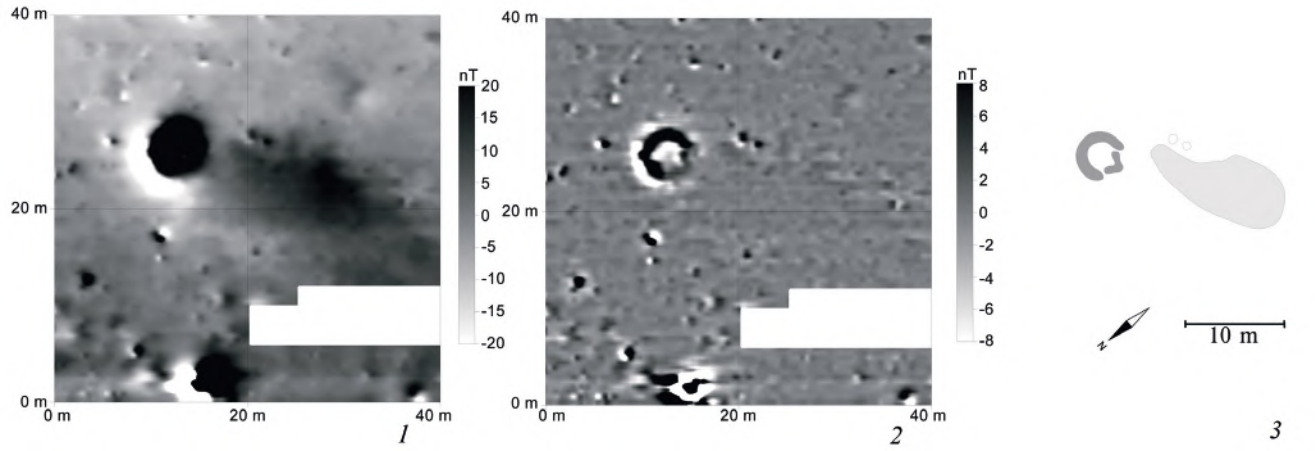

Рис. 7. Гроспрюфенинг (Бавария). Типичная магнитная аномалия крупного гончарного горна со следами золистых слоев, которые видны только в режиме измерения полного поля: *1* – измерение полного поля; *2* – после применения фильтра верхних частот; *3* – археологическая интерпретация.

Fig. 7. Grossprüfening, Bavaria. A typical magnetic anomaly of a large pottery furnace with traces of ash layers visible only in the total-field measurement mode

порода, слои отложений и погребенная или археологическая почва обладают остаточной намагниченностью (Fassbinder, 1994; Dunlop, Özdemir, 1997). Первичная естественная намагниченность (NRM – natural remanent magnetization) может возникнуть в силу четырех причин: термической, детритовой, химической или вызываемой молниями остаточной намагниченности. Роль магнитного остатка для поиска с помощью магнитометра может быть продемонстрирована на примере изучения могильника в Казахстане и квадратной изгороди раннего железного века в Баварии (см. ниже, рис. 4 и 9).

Термоостаточная намагниченность (TRM – thermoremanent magnetization). Если скальные породы, слои отложений или почвы подвергаются воздействию высоких температур, они изначально намагничиваются термомагнитной намагниченностью (TRM). Когда составляющие их магнитные минералы охлаждаются до точки Кюри (или блокирующей температуры) в окружающем геомагнитном поле, направление их намагниченности будет “заблокировано”: выровнено по направлению магнитного поля Земли на это время. Высокая магнитная интенсивность, вызванная такими археологическими объектами, как керамические печи, отопительные сооружения и места производства металла, происходит от TRM, и их можно легко идентифицировать на магнитограмме (см. ниже, рис. 7). Термомагнитная намагниченность происходит в момент последнего охлаждения, поэтому зарегистрированное магнитное поле будет тем, которое существует в самое последнее время нагрева и которое может значительно отличаться от магнитного поля сегодняшнего дня.

Детритовая остаточная намагниченность (DRM – detrital remanent magnetization). Когда археологическая почва, содержащая постоянно намагниченные оксидные зерна, откладывается в воде (например, в яме, канаве или в углублениях грунта), зерна имеют тенденцию ориентироваться в положении минимальной энергии, то есть с их магнитной осью, выровненной вдоль или параллельно направлению окружающего магнитного поля. Хотя между многими зернами обычно все еще существует некоторая дезориентация, статистическое выравнивание вдоль направления поля, существующего в то время, сохраняется; это называется детритовой остаточной намагниченностью (DRM). Если есть некоторые зерна, которые являются достаточно маленькими по отношению к объемам внедрения, они будут продолжать выравниваться с окружающим полем, поскольку они поддерживаются поровой водой, захваченной в промежутках между почвами. Такие крошечные зерна могут качаться на одной линии, не подвергаясь воздействию окружающих осадков даже после осаждения. Это обозначается как постдепозиционная остаточная намагниченность (PDRM). Хотя такие остаточные значения довольно слабые, они могут привести к обнаруживаемой магнитной аномалии, если они остаются *in situ*. Смешивание этих отложений

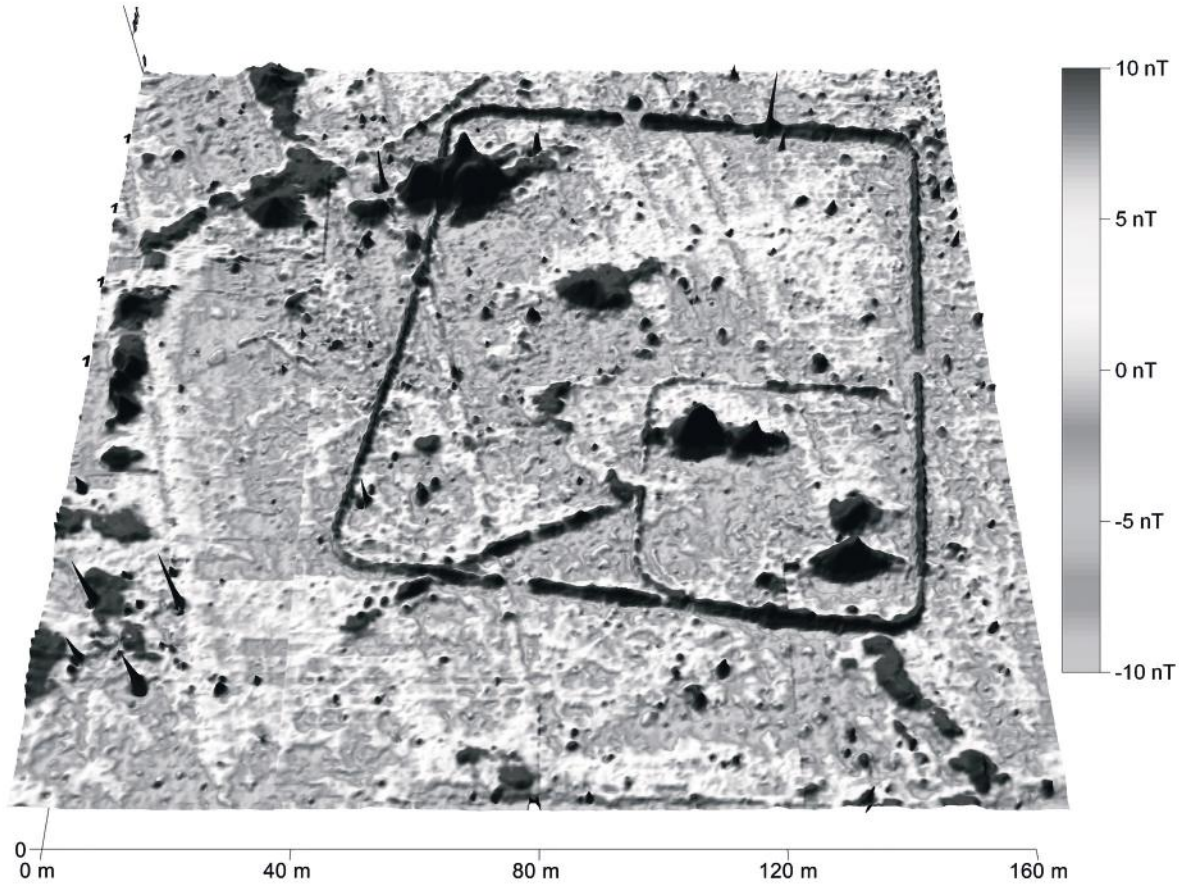

Рис. 8. Бургсалах, Бавария. Изображение римского лагеря, полученное с помощью магнитометра и обработанное как псевдо-3D. Очень четко выявляются две археологические фазы строительства укрепления.

Fig. 8. Burgsalach, Bavaria. The image of a Roman camp obtained with a magnetometer and processed as a pseudo-3D (two phases of constructing fortifications are visible)

с помощью различных вмешательств, таких как выкапывание и засыпка материала в канаву или яму, так что магнитные минералы и их домены перемешиваются случайным образом, приводит к "механическому размагничиванию" (Fassbinder, Becker, 2003; Fassbinder, Gorka, 2009b; Fassbinder, 2010b).

Химическая остаточная намагниченность (CRM – chemical remanent magnetization). При нормальных температурах поверхности Земли и для достаточно малых магнитных частиц преобладают тепловые флуктуации, а расположение частиц случайное. Однако, если объем частиц превышает критическое значение, магнитостатические силы преодолевают тепловые флуктуации и создают химическую или кристаллическую остаточную намагниченность.

Остаточная намагниченность, вызванная молниями (LIRM – lightning-induced remanence). Удар молнии может вызвать намагниченность в области, непосредственно прилегающей к пораженному участку, включая камни, отложения и почвы. Такое намагничивание от удара молнии легко распознать по его аномально высокому коэффициенту Кёнигсбергера (Qn), его магнитной интенсивности (>200 нанотесла), а в отношении магнитной разведки также по типичным звездообразным структурам (см. ниже, рис. 6) (Maki, 2005; Fassbinder, Gorka, 2009a).

Интерпретация данных магнитометра и изображения магнитограммы. В простой форме магнитограмма предлагает легко узнаваемое распределение структур под землей. Знание магнитных свойств почвы в сочетании с описательными и сравнительными методами археологической интерпретации формируют основу для получения оптимальных результатов с использованием этого подхода (Neubauer, Eder-Hinterleitner, 1997; Fassbinder, Irlinger, 1999).

Положительные магнитные аномалии на археологических памятниках. Наиболее распространенной ситуацией почти во всех почвах мира является усиление намагниченности и обогащение магнитным полем верхнего почвенного слоя. Следовательно, любая яма, канава или деревянный столб, заполненный верхним слоем почвы, вызовет положительную магнитную аномалию. Если такая структура пополняется однородным верхним слоем почвы, интенсивность и форма аномалии пропорциональны размеру и объему археологического объекта. Любая концентрация глиняной посуды, золы или сгоревшего материала, а также твердых пород или другого материала вызовет отклонение и, таким образом, будет определять интенсивность и форму магнитной аномалии. Неолитический кольцевой ров из Штейнабрунна (Северо-Восточная Австрия) дает идеальный пример этой ситуации (рис. 2).

Отрицательные магнитные аномалии на археологических памятниках могут иметь множество причин:

1) Материал археологической структуры обладает меньшей магнитной восприимчивостью, чем прилегающий верхний слой почвы. Например, это будет иметь место в том случае, если в окружающей магнитной почве имеются остатки построек из слабомагнитного известняка или песчаника, а также когда сырцовые кирпичи сделаны из более песчанистого материала, чем окружающий сырец, обломки керамики и обожженные материалы. План основания дворца Рамзеса II в Египте проявляется как отрицательная магнитная аномалия для обширных частей стены, но в некоторых областях она выглядит также как положительная в зависимости от магнитной восприимчивости глиняных кирпичей (рис. 3). Однако места колонн всегда были видны как отрицательная аномалия из-за их оснований из известняка и/или песчаника. Измерения магнитной восприимчивости глиняных кирпичей на месте подтвердили эту гипотезу (Fassbinder, 2017).

2) Отрицательная магнитная аномалия может также возникать всякий раз, когда обнаруживается выкопанная яма, которая была немедленно заполнена тем же материалом. Результирующая напряженность магнитного поля, которая возникает из-за индуцированной плюс остаточной намагниченности, уменьшается из-за остаточной части почвы. Иными словами, независимо от того, какая остаточная намагниченность была у почвы, она была рандомизирована процессом переотложения и, следовательно, аннулирована. Поэтому результирующая магнитограмма покажет отрицательную аномалию по сравнению с соседней интенсивностью в пределах нетронутых почвенных областей. О схожих историях возникновения магнитных аномалий, которые, скорее всего, можно объяснить таким образом, сообщается, хотя и редко (Fassbinder, Irlinger, 1998b; Fassbinder, 2010b). Яркий пример такого случая был найден в степях Северо-Восточного Казахстана (рис. 4), где рядом со скифским курганом было исламское кладбище XVII в. Участок состоит из овального рва, который все еще имеет глубину 40 см и виден на поверхности земли. Внутри овала находится небольшое мемориальное квадратное место, также окруженное небольшим рвом. Хотя в рельефе больше ничего не прослеживалось, в оставшейся области было обнаружено около 40 отрицательных (белых) аномалий, размерами ок. 1 × 2 м; вполне вероятно, что их можно отнести к погребальным ямам. Эти ямы были выкопаны на глубине ок. 1.8–2 м для совершения захоронений, а затем они сразу же были засыпаны тем же лессовым грунтом, который был выкопан при устройстве могильных ям (Fassbinder, Becker, 2003).

3) Геохимический процесс, такой как частичное растворение ферримагнитных частиц и осаждение оксидов железа, таких как гетит, ферригидрит и лепидокроцит, является еще одной основной причиной возникновения отрицательной магнитной аномалии. В почвах, где есть застойная влажность в сочетании с изменяющимся уровнем грунтовых вод, первоначально положительная аномалия может быть преобразована в отрицательную. Бывший ров земляного сооружения, изначально заполненный верхним слоем почвы и органическим материалом с высокой магнитной восприимчивостью, может в конечном итоге проявиться как отрицательная аномалия. Хорошим примером этого является неолитическое городище Риекофен в Баварии. Центральное поселение лежит на небольшом холме всего в 1.5 м над небольшой рекой. Внутренний ров показывает нормальное положительное намагничивание, тогда как внешний был частично затоплен водой и имеет “отрицательный” след (рис. 5) (Fassbinder, Irlinger, 1998a; Schleifer et al., 2003). Временная влажность почвы также является одной из основных причин, по которой крупные рвы кельтских квадратных городищ становятся магнитно “невидимыми”,

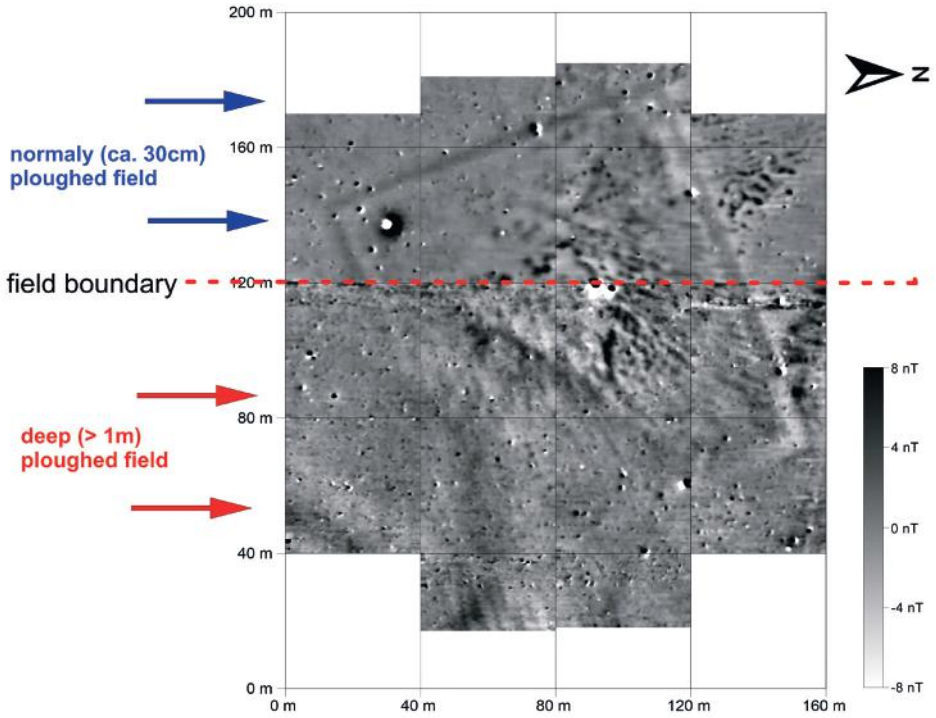

Рис. 9. Пфеффенхаузен, Бавария. План типичного квадратного городища позднего железного века, который был частично разрушен глубокой вспашкой (>1 м в глубину).

Fig. 9. Pfeffenhausen, Bavaria. A plan of a typical square ancient settlement of the Late Iron Age partially destroyed by deep plowing (>1 m deep)

несмотря на то что они четко проявляются на аэрофотоснимках в ходе воздушной разведки (Fassbinder, 2005; Berghausen, 2014).

Остаточные элементы, вызванные ударом молнии. Можно привести широкий спектр примеров магнитных аномалий, вызванных ударами молний, в местах археологических раскопок. В ранних обзорах такие аномалии часто неправильно понимались и ошибочно интерпретировались. Вызванные молнией аномалии обычно имеют форму звезды и характеризуются изменяющимся направлением их остаточного положения. В то время как термомагнитная намагниченность археологических объектов выявляет аномалии, которые более или менее параллельны магнитному полю Земли во время нагревания, остаточное воздействие, вызванное молнией, имеет неустойчивые направления, которые следуют за следами электрического тока в почве. Наибольшая плотность вызванных молнией аномалий была обнаружена в связи со знаменитыми геоглифами Наска, Перу (рис. 6). Хотя они расположены в одной из самых засушливых областей на Земле (среднее количество осадков составляет здесь менее 5 мм в год), они находятся на границе между пустыней и плодородной землей и в прошлом подвергались сильным ударам молнии (персональное сообщение Б. Эйтеля; Eitel et al., 2005). На измеренной площади ок. 100 га (пять трапециевидных геоглифов вокруг Пальпы, Перу) было обнаружено 50 ударов молнии (Fassbinder, Gorka, 2009a).

Термоостаточная магнитная аномалия. На рис. 7 показан в качестве примера горн, который был обнаружен с помощью магнитной разведки вблизи римской крепости Гроспрюфенинг (г. Регенсбург, Бавария). Нормализованная магнитная аномалия измерения полного поля имеет большую положительную (черную) круглую форму (около ±20 нТл) с прилегающей к ней областью овальной формы. Эти признаки были обусловлены обогащением мелкозернистых магнитных минералов в верхнем слое почвы (±8 нТл). Применение фильтра высоких частот к набору данных позволяет нам визуализировать округлую форму и план основания печи во всех ее деталях, включая внутреннее пространство горна. Магнитные следы отложений золы, расположенных за

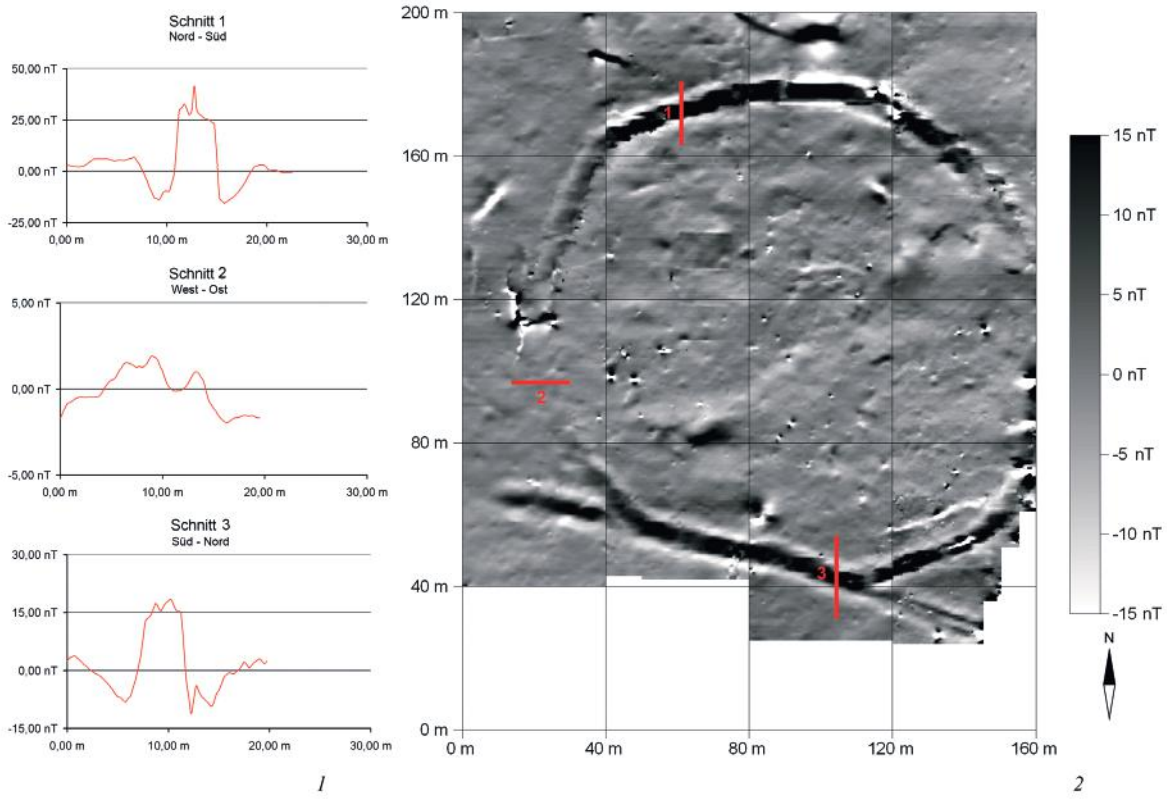

Рис. 10. Белла Виста (Боливия): *1* – избранные профили по археологическим сооружениям; *2* – магнитограмма типичного кольцевого рва доиспанской культуры. Северная и южная части кольцевой канавы хорошо видны, а восточная и западная части кольца почти исчезли.

Fig. 10. Bella Vista (Bolivia) (*1* – selected profiles for archaeological structures; *2* – a magnetogram of a typical ring ditch of a pre-Hispanic culture)

ним, были удалены с помощью фильтра верхних частот (Fassbinder et al., 2011).

Магнитное обследование археологической стратиграфии. Магнитная разведка не очень подходит для обнаружения археологических слоев и различения их друг от друга. Тем не менее есть некоторые тематические исследования, которые демонстрируют возможность различения по крайней мере двух фаз стратиграфической археологической последовательности (Fassbinder, Irlinger, 1999). Римский лагерь Бургсалах (рис. 8) является одним из таких примеров. Небольшой римский лагерь, размерами ок. 40 × 40 м, был укреплен частоколом (видимым в виде небольшого узкого рва), затем на втором этапе он был перестроен и расширен до размеров ок. 100 × 120 м. Более старый след частокола был обнесен новым, и он стал видимым для магнитометра на стыке обеих конструкций. Эта геофизическая интерпретация подтверждается археологическими исследованиями, основанными на анализе топографического плана объекта. Симметрия и входы в укрепление поздней фазы следуют контурам меньшего по площади более старого лагеря (Fassbinder, Gorka, 2009b).

Механическое размагничивание археологических объектов. Кельтские квадратные ограждения – это типичные земляные сооружения, распространенные в Южной Баварии, Баден-Вюртемберге, а также во Франции. Магнитная разведка почти 40 объектов в Баварии позволила выявить основные характеристики этих памятников (Fassbinder, 2005). Почти все они состояли из земляного вала, огороженного рвом. В приводимом нами примере более половины участка было разрушено (механически размагничено) глубокой вспашкой (рис. 9). Размагничивание естественных слоев почвы происходит также при сооружении

захоронений, в результате чего полученная аномалия будет отрицательной (рис. 4).

Магнитное обследование вблизи геомагнитного экватора. Хотя имеются многочисленные примеры проведения магнитной разведки для археологических памятников в Северном полушарии, только редкие статьи сообщают о памятниках, расположенных вблизи геомагнитного экватора (Tite, 1966; Fassbinder, Becker, 1999; Magnavita, Schleifer, 2004; Schmidt et al., 2009; Fassbinder, Gorka, 2011). Вероятно, есть две причины для этого. Во-первых, геофизика хорошо зарекомендовала себя как метод поиска в ходе археологических полевых работ в Европе, России и Северной Америке, а также в Китае и Японии, но она слабо развита в странах на экваториальных широтах. Во-вторых, результаты магнитометрических исследований вблизи геомагнитного экватора являются сложными и требуют специальных знаний для правильной археологической интерпретации. Форма магнитной аномалии одного и того же элемента резко меняется в зависимости от географической широты, а также от типа используемого магнитометра.

Пример исследования, проведенного в Северной Боливии, демонстрирует определенные трудности. Доиспанские археологические памятники и кольцевые рвы возле Белла Виста в низменностях Льянос-де-Моксос были обнаружены после масштабной вырубки леса в 1999 г. Первые раскопки археологов Германского археологического института выявили единичные захоронения внутри рвов, но никаких других сооружений или следов поселений обнаружено не было. На магнитограмме (рис. 10) отчетливо видны все сложности, связанные с интерпретацией данных магнитометрии вблизи геомагнитного экватора. Несмотря на полностью сохранившееся кольцо рва, это сооружение явно проявляется только в северной и южной частях. Полученный результат довольно хорошо сопоставим с теоретическим предсказанием и формой магнитных аномалий на экваторе.

Заключение. Без магнитной разведки многие детали археологических раскопок, вероятно, останутся незамеченными и неисследованными на последующей фазе раскопок. Однако магнитная разведка может быть успешной только в местах, где существует магнитный контраст между археологическими структурами и смежными ненарушенными слоями почвы. До сегодняшнего дня не было выявлено простой корреляции между разнообразием геохимических условий и магнитными свойствами почвы. В настоящее время нет способа предсказать магнитные свойства почвы и, следовательно, будет ли магнитная разведка успешной или нет.

Магнитная разведка может предоставить подробные планы древних поселений и даже целых городов, а также монументальных зданий разных эпох и культур. В частности, обследование множества археологических памятников определенных типов и культур дает ценную информацию как для археологических и геофизических исследований, так и для охраны культурного наследия (Fassbinder, 2005; 2010a; Berghausen, 2014). С пониманием основ магнитной науки о породах и минералах, знанием процессов их образования, специфики магнитной восприимчивости и различных типов остаточной намагниченности становится возможным объяснить значительное количество деталей о скрытых под землей археологических структурах. Возможности геофизики зависят от магнитной аномалии, которая определяется интенсивностью и направлением намагниченности. Дальнейший анализ может провести различие между индуцированной и остаточной намагниченностью, а также может дать информацию о различных археологических фазах выявляемых объектов. Возможности археологии позволяют приблизительно датировать обнаруженные объекты, сравнивая расположение их структур с уже известными из других раскопок.

Методология, инструментальные измерения, чувствительность и обработка изображений для магнитной разведки будут продолжать улучшаться, но уже сейчас результаты магнитометрических исследований сопоставимы с планами археологических раскопок. Специфические структуры и форма объектов позволяют проводить приблизительное датирование участка без какого-либо разрушительного удаления культурного слоя в процессе расчистки сооружений. Магнитометрические исследования никогда не станут заменой археологическим раскопкам, но они должны предшествовать каждому археологическому полевому проекту, чтобы максимизировать его эффективность и свести к минимуму физическое разрушение археологического наследия.

MAGNETOMETRY IN ARCHAEOLOGY – FROM THEORY TO PRACTICE

Jörg W.E. Fassbinder

Ludwig-Maximilians University of Munich, Federal Republic of Germany

E-mail: fassbinder@geophysik.uni-muenchen.de

Magnetic prospection was applied for the first time to archaeology in 1956, and over the years since then, it has become one of the most important archaeological methods for the detection and mapping of buried remains at large archaeological sites. Magnetic detection methods are extremely sensitive in the characterization and detection of iron oxides, much more so than any other form of chemical analysis. Therefore, given a full understanding of the nature of magnetic properties, many details of soil layers and buried archaeological structures can be discovered, visualized, and interpreted only by the "magnetic eye". A complete archaeological interpretation prior to excavation must consider all available archaeological background information as well as surface findings, however, many more crucial details can be derived through a comprehensive soil magnetic analysis, and many new archaeological questions arise from such geophysical prospecting results. The article presents a description of the magnetometric method fundamentals. Special attention is paid to different types of magnetization of archaeological objects and peculiarities of their interpretation..

Keywords: magnetometry, field magnetometers, soil magnetism, archaeological interpretation.

REFERENCES

Aitken M.J., 1958. Magnetic Dating I. *Archaeometry*, vol. 1, iss. 1, pp. 16–20.

Aitken M.J., 1974. Physics and Archaeology. 2nd edition. Oxford: Clarendon Press. 291 p.

Aspinall A., Gaffney C.F., Schmidt A., 2008. Magnetometry for Archaeologists. Lanham, Maryland: Altamira Press. 219 p.

Becker H., 1995. From nanotesla to picotesla – a new window for magnetic prospecting in archaeology. *Archaeological Prospection*, vol. 2, iss. 4, pp. 217–228.

Becker H., 1997. Hochauflösende Magnetik am Beispiel der archäologischen Prospektion. *Umweltgeophysik*. M. Beblo, ed. Berlin: Ernst und Sohn, pp. 59–70.

Becker H., Fassbinder J.W.E., 1999. In search for Piramesses – the lost capital of Ramesses II in the Nile delta (Egypt) by caesium magnetometry. *Archaeological Prospection: Third International Conference on Archaeological Prospection*. J.W.E. Fassbinder, W. Irlinger, eds. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, pp. 146–150. (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 108).

Belshé J.C., 1957. Recent magnetic investigations at Cambridge University. *Advances in Physics*, vol. 6, iss. 22, pp. 192–193.

Benech C., 2005. Étude des plans d'urbanisme antiques. *Dossiers d'Archéologie*, 308, pp. 12–19.

Berghausen K., 2014. Magnetometrische Untersuchungen an keltischen Viereckschanzen in Bayern. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. 174 p. (Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 9).

Chwala A., Stolz R., Ijsselsteijn R., Schulze V., Ukhansky N., Meyer H.-G., Schüler T., 2001. SQUID gradiometers for archaeometry. *Superconductor Science and Technology*, vol. 14, no. 12, pp. 1111–1114.

Clark A., 1996. Seeing Beneath the Soil: Prospecting Methods in Archaeology. London: Batsford. 192 p.

David A., Linford N., Linford P., Martin L., Payne A., 2008. Geophysical Survey in Archaeological Field Evaluation. 2nd edition. Swindon: English Heritage. 60 p.

Dunlop D.J., Özdemir Ö., 1997. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge: Cambridge University Press. 594 p.

Eitel B., Hecht S., Mächtle B., Schukraft G., Kadereit A., Wagner G.A., Kromer B., Unkel I., Reindel M., 2005. Geoarchaeological evidence from desert loess in the Nazca-Palpa region, southern Peru: Palaeoenvironmental changes and their impact on pre-Columbian cultures. *Archaeometry*, vol. 47, iss. 1, pp. 137–158.

Fassbinder J.W.E., 1994. Die magnetischen Eigenschaften und die Genese ferrimagnetischer Minerale in Böden im Hinblick auf die magnetische Prospektion archäologischer Bodendenkmäler. Buch am Erlbach: Marie Leidorf. 143 p.

Fassbinder J.W.E., 2005. Methodische Untersuchungen zur Magnetometerprospektion von Viereckschanzen. *Viereckschanzen: Rätselhafte Bauwerke der Kelten*. P. Neumann-Eisele, ed. Kelheim: Archäologisches Museum, pp. 11–22. (Museumsheft, 8).

Fassbinder J.W.E., 2007. Unter Acker und Wadi: Magnetometerprospektion in der Archäologie. *Einführung in die Archäometrie*. G.A. Wagner, ed. Erlin: Springer, pp. 53–73.

Fassbinder J.W.E., 2010a. Von Eining bis Ruffenhofen: Auf dem Weg zu einem Magnetogramm-Atlas der raetischen Limeskastelle – Ergebnisse der geophysikalischen Prospektion in Bayern. *Perspektiven der Limesforschung. 5. Kolloquium der Deutschen Limeskommission (2009)*. P. Heinrich, ed. Stuttgart: Theiss, pp. 88–103. (Beiträge zum Welterbe Limes, 5).

Fassbinder J.W.E., 2010b. Magnetometerprospektion des neolithischen Erdwerkes von Altheim. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 2009. Stuttgart: Theiss, pp. 26–29.

Fassbinder J.W.E., 2015. Seeing beneath the farmland, steppe and desert soil: Magnetic prospecting and soil magnetism. *Journal of Archaeological Science*, 56, pp. 85–95.

Fassbinder J.W.E., 2017. Magnetische Eigenschaften der archäologischen Schichten von Qantir (Ägypten). *Forschungen in der Ramses-Stadt*, 9, pp. 327–350.

Fassbinder J.W.E., Becker H., 1999. Magnetic prospection of a megalithic necropolis at Ibbankatuvwa (Sri Lanka). *Archaeological Prospection: Third International Conference on Archaeological Prospection*. J.W.E. Fassbinder, W. Irlinger, eds. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, pp. 106–109. (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 108).

Fassbinder J.W.E., Becker H., 2003. Magnetometerprospektion des großen Kurgans 1 von Bajkara. *Der grosse Kurgan von Bajkara: Studien zu einem skythischen Heiligtum*. H. Parzinger, V. Zajbert, A. Nagler, A. Plesakov, eds. Mainz: Von Zabern, pp. 131–136. (Archäologie in Eurasien, 16).

Fassbinder J.W.E., Becker H., van Ess M., 2005. Prospections magnétiques à Uruk (Warka). La cité du roi Gilgamesh (Irak). *Dossiers d'Archéologie*, 308, pp. 20–25.

Fassbinder J.W.E., Bondar K., Vogt B., Moser J., 2009. Magnetometerprospektion und magnetische Eigenschaften von Basalt-Böden am Beispiel der Osterinsel (Isla de Pasqua), Chile. *Archäometrie und Denkmalpflege 2009: Jahrestagung in der Pinakothek der Moderne*. A. Hauptmann, H. Stege, eds. Bochum: Deutsches Bergbau-Museum, pp. 41–44. (Metalla, 2).

Fassbinder J.W.E., Gorka T., 2011. Magnetometry near to the geomagnetic Equator. *Archaeological Prospection: 9th International Conference on Archaeological Prospection*. M.G. Drahor, M.A. Berge, eds. Istanbul: Archaeology and Art Publications, pp. 45–48.

Fassbinder J.W.E., Gorka T.H., 2009a. Beneath the desert soil – archaeological prospecting with a caesium magnetometer. *New Technologies for Archaeology: Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca, Peru*. M. Reindel, G.A. Wagner, eds. Berlin: Springer, pp. 49–69.

Fassbinder J.W.E., Gorka T.H., 2009b. Vermessen? Das Römerkastell Burgsalach, Landkreis Weißenburg-Gunzenhausen, Mittelfranken. *Das archäologische Jahr in Bayern, 2008*. Stuttgart: Theiss, pp. 76–79.

Fassbinder J.W.E., Irlinger W.E., 1998a. Geophysikalische Prospektion in einem mehrphasigen Grabenwerk der Hallstattzeit auf dem Sandbuck bei Reinboldsmühle, Gemeinde Buxheim, Landkreis Eichstätt, Oberbayern. *Das archäologische Jahr in Bayern*, 1997. Stuttgart: Theiss, pp. 87–90.

Fassbinder J.W.E., Irlinger W.E., 1998b. Magnetometerprospektion eines endneolithischen Grabenwerkes bei Riekofen, Lkr. Regensburg. *Beiträge zur Archäologie in der Oberpfalz*, 2. Frankfurt, pp. 47–54.

Fassbinder J.W.E., Irlinger W.E., 1999. Combining magnetometry and archaeological interpretation. *Archaeological Prospection: Third International Conference on Archaeological Prospection*. J.W.E. Fassbinder, W. Irlinger, eds. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, pp. 95–99. (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, 108).

Fassbinder J.W.E., Narr D., Linck R., Deller T., Becker F., 2011. Prospektion am römischen Kastell Großprüfening. *Das archäologische Jahr in Bayern, 2010*. Stuttgart: Theiss, pp. 92–95.

Fassbinder J.W.E., Stanjek H., 1993. Occurrence of bacterial magnetite in soils from archaeological sites. *Archaeologia Polona*, 31, pp. 117–128.

Fassbinder J.W.E., Stanjek H., Vali H., 1990. Occurrence of magnetic bacteria in soil. *Nature*, 343(6254), pp. 161–163.

Fröhlich N., Posselt M., Schleifer N., 2003. Excavating in a "blind mode". Magnetometer survey, excavation and magnetic susceptibility measurements of a multiperiod site at Bad Homburg, Germany. *Archaeologia Polona*, 41, pp. 167–169.

Gaffney C.F., Gater J.A., Linford P.K., Gaffney V.L., White R., 2000. Large-scale systematic fluxgate gradiometry at the Roman City of Wroxeter. *Archaeological Prospection*, vol. 7, iss. 2, pp. 81–99.

Le Borgne E., 1955. Susceptibilité magnétique anormale du sol superficiel. *Annales de Geophysique*, 11, pp. 399–419.

Le Borgne E., 1960. Influence du feu sur les proprietes magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. *Annales de Geophysique*, 16, pp. 159–195.

Lenz J.E., 1990. A review of magnetic sensors. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 78, iss. 6, pp. 973–989.

Magnavita C., Schleifer N., 2004. A look into the Earth: Evaluating the use of magnetic survey in African archaeology. *Journal of African Archaeology*, vol. 2, iss. 1, pp. 49–63.

Maki D.L., 2005. Lightning strikes and prehistoric ovens: Determining the source of magnetic anomalies using techniques of environmental magnetism. *Geoarchaeology*, vol. 20, iss. 5, pp. 449–459.

Mullins C.E., 1977. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science – a review. *European Journal of Soil Science*, vol. 28, iss. 2, pp. 223–246.

Neubauer W., Eder-Hinterleitner A., 1997. 3D-interpretation of postprocessed archaeological magnetic prospection data. *Archaeological Prospection*, vol. 4, iss. 4, pp. 191–205.

Neubauer W., Eder-Hinterleitner A., Seren S.S., Doneus M., Melichar P., 1998–1999. Kombination archäologisch-geophysikalischer Prospektionsmethoden am Beispiel der römischen Zivilstadt Carnuntum. *Archaologia Austriaca*, 82–83, pp. 1–26.

Schleifer N., 2004. Ghost features – A proposal for appropriate management and a forum for discussion. *Newsletter of the International Society of Archaeological Prospection*, 1, pp. 6–9.

Schleifer N., Fassbinder J.W.E., Irlinger W.E., Stanjek H., 2003. Investigation of an eneolithic chamer-group ditchsystem near Riekofen (Bavaria) with archaeological, geophysical and pedological methods. *Soils and Archaeology: Papers of the 1st International Conference on Soils and Archaeology (2001).* G. Füleky, ed. Oxford: Archaeopress, pp. 59–63. (British Archaeological Reports, International Series, 1163).

Schmidt A., 2002. Geophysical Data in Archaeology: A Guide to Good Practice. 2nd edition. Oxford: Oxbow Books. 88 p.

Schmidt A., Coningham R., Gunawardhana P., 2009. At the equator: Making sense of magnetomer data. *Archéo-Sciences*, vol. 33, Supplement, pp. 345–347.

Schultze V., Chwala A., Stolz R., Schulz M., Linzen S., Meyer H.-G., Schüler T., 2007. A superconducting quantum interference device system for geomagnetic archaeometry. *Archaeological Prospection*, vol. 14, iss. 3, pp. 226–229.

Scollar I., Krückeberg F., 1966. Computer treatment of magnetic measurements from archaeological sites. *Archaeometry*, vol. 9, iss. 1, pp. 61–71.

Scollar I., Tabbagh A., Hesse A., Herzog I., 1990. Archaeological Prospecting and Remote Sensing. Cambridge: Cambridge University Press. 692 p.

Stanjek H., Fassbinder J.W.E., Vali H., Wägele H., Graf W., 1994. Evidence of biogenic greigite (ferrimagnetic Fe_3S_4) in soil. *European Journal of Soil Science*, vol. 45, iss. 2, pp. 97–102.

Taylor R.M., Maher B.A., Self P.G., 1987. Magnetite in soils: I. The synthesis of single-domain and superparamagnetic magnetite. *Clay Minerals*, vol. 22, iss. 4, pp. 411–422.

Tite M., 1966. Magnetic prospecting near to the geomagnetic equator. *Archaeometry*, vol. 9, iss. 1, pp. 24–31.

Tucker P.M., 1952. High magnetic effect of lateritic soil in Cuba. *Geophysics*, vol. 17, iss. 4, pp. 753–755.