

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

930.26
621.317 444/.445

**ПРИМЕНЕНИЕ РУБИДИЕВОГО МАГНЕТОМЕТРА
В АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ *)**

Шелдон Брейнер

Пропуская через пустую бутыль пучок фиолетовых лучей, мы можем сильно увеличить наши шансы найти давно засыпанные землей развалины древних укреплений или сохранившиеся до наших дней образцы гончарного производства. Отметим, однако, что этот пучок фиолетовых лучей и пустая бутыль являются основной рабочей частью рубидиевого магнитометра — прибора, эффективность которого была недавно продемонстрирована при составлении карты расположения различных строений, а также осколков глиняной посуды, в археологических изысканиях, проводившихся вблизи предполагаемого местонахождения древнегреческого города Сибариса. Применение рубидиевого магнитометра открывает огромные возможности для самых различных аспектов археологических методов, основанных на использовании магнитной техники, так как чувствительность этого прибора более чем в 100 раз превосходит чувствительность всех ранее употреблявшихся магнитометров.

Важность дальнейшей разработки методов определения местонахождения погребенных под землей городов, а также любых предметов, представляющих археологический интерес, очевидна даже человеку, не имеющему никакого отношения к археологии.

Методы пробных раскопок, т. е. раскопок, проводящихся в выбранных паугад местах, оказываются просто неразумными в тех случаях, когда отсутствуют какие-либо доказательства необходимости раскопок, в частности, археологические предметы, найденные на поверхности предполагаемого места раскопок. Однако существуют и другие методы, призванные оказать помощь археологу в его исследованиях. К числу этих методов относятся:

1. Изучение древних рукописей.
2. Систематические пробы почвы, проводящиеся путем бурения, драгирования и выкачивания рвов.
3. Анализ результатов аэрофотосъемки.
4. Использование геофизических методов, основанных на сейсмической, электрической или магнитной технике¹.

В настоящей статье мы рассмотрим последний из упомянутых методов, т. е. расскажем о методе археологической разведки, основанной на магнитной технике.

*) Sheldon B r e i n e r, The Rubidium Magnetometer in Archeological Exploration, Science 150, 185 (1965). Перевод В. Б. Мандельцвейга и М. С. Маринова. В оригинале — резюме: «Высокочувствительный магнитометр позволяет применить более эффективную методику изысканий».

После того как в 1955 г. появился первый ненаправленный магнитный пеленгатор, являющийся достаточно надежным и вместе с тем весьма мобильным прибором для проведения магнитного обследования местности (этим прибором был протонный магнетометр²), скорость и простота выполнения соответствующих археологических изысканий резко увеличилась. С этого времени появилось множество работ, описывающих результаты и методы использования протонного магнетометра для обнаружения местонахождения могил, гончарных печей, крепостных стен и остатков древних укреплений, находящихся под слоем почвы^{3, 4}.

Портативный прибор, например такой, как протонный магнетометр Элсека¹, способен реагировать на изменение магнитного поля величиной около одной гаммы (10^{-5} э) там, где интенсивность магнитного поля Земли составляет примерно 50 000 гамма. Столь высокой точности, а также простоты и мобильности прибора удалось достигнуть благодаря известному эффекту в области физики ядерного магнитного резонанса, получившему название свободной прецессии. Дело в том, что благодаря наличию спина протоны в жидкости, подобной воде, ведут себя подобно очень маленьким, случайно ориентированным магнитикам. При включении внешнего магнитного поля спины протонов выстраиваются вдоль направления его силовых линий. Если теперь изменить направление внешнего магнитного поля, то спины протонов начинают прецессировать вокруг нового направления этого поля, причем частота прецессии пропорциональна его интенсивности. Следует, однако, иметь в виду, что на практике точность измерения поля ограничивается следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, максимальная чувствительность портативного протонного магнетометра составляет около 1 гамма. Во-вторых, акт поляризации протонов занимает некоторое время, в связи с чем прибор не может работать непрерывным образом (в частности, портативный вариант прибора позволяет снимать показания примерно раз в 4–6 секунд). В 1957 г. Демельтом⁵ был описан метод оптического высовечивания и контроля энергетических состояний электронов щелочных металлов. Оптическое высовечивание состоит в том, что электроны атома вынуждают совершать некоторые энергетические переходы, в результате чего они концентрируются на определенном энергетическом подуровне атома⁶. Этот метод является весьма чувствительным способом измерения частоты переходов в атомах, причем он обладает гораздо большей чувствительностью к величине внешнего магнитного поля, чем ранее употреблявшийся метод протонной прецессии. Кроме того, в силу непрерывности процесса высовечивания подобный метод очень удобен для измерения напряженности переменного поля.

Указанные принципы были применены при конструировании нового магнетометра, в котором, наряду с другими элементами, использовались пары рубидия. Военно-морские силы США и Национальное управление аэронавтики и исследования космического пространства наладили производство таких приборов для геофизических исследований, в частности, подобные приборы использовались для измерений интенсивности магнитного поля космоса с помощью ракет и спутников. В дальнейшем были сконструированы рубидиевые магнетометры, предназначенные для контроля за микропульсациями земного магнитного поля; они были установлены в наземных наблюдательных пунктах в различных точках земного шара. В последующее время рубидиевый магнетометр применялся также для поиска нефти и полезных ископаемых, и лишь после этого он был использован полевыми археологическими экспедициями.

ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ

Рубидиевый магнитометр является одним из серий почти идентичных приборов, основанных на принципах оптического высвечивания и контроля. Были сконструированы и введены в эксплуатацию магнитометры, использовавшие в качестве активных элементов Rb^{85} , Rb^{87} , цезий, калий, натрий или метастабильный гелий. Тип активного элемента или изотопа определяет температуру, частоту и точность, отвечающие данной конструкции магнитометра; для вышеперечисленных элементов эти характеристики лишь слегка отличаются друг от друга. В рубидиевом магнитометре, например, для осуществления процесса высвечивания и измерения

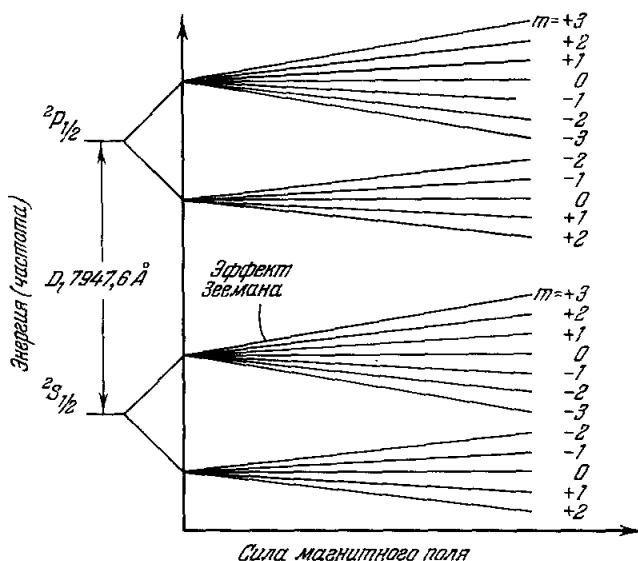


Рис. 1. Диаграмма энергетических уровней Rb^{85} .

употребляется Rb^{85} , который является источником фотонов с длиной волны 7948 Å. Пучок этих фотонов пропускается через стеклянный сосуд, содержащий газообразный Rb^{85} . Прозрачность этого сосуда становится меньше, когда фотоны поглощаются валентными электронами газообразного рубидия; в результате такого процесса энергия электрона увеличивается, ион переходит из основного состояния $^2S_{1/2}$ в возбужденное $^2P_{1/2}$ состояние (рис. 1). Подобный переход, в соответствии с квантовой механикой, должен сопровождаться увеличением на единицу числа m , характеризующего соответствующий подуровень, на котором ранее находился электрон. Энергия, соответствующая поглощенному фотону, вскоре снова излучается, в связи с чем электрон опять оказывается в основном состоянии, готовый к поглощению следующего фотона. Отметим, что при этом электрон с равной степенью вероятности может попасть на любой подуровень основного состояния. Так как количество подуровней в основном и возбужденном состояниях одинаково, то электроны, находящиеся на подуровне с наибольшим m , не могут перейти в возбужденное состояние лишь путем поглощения фотона. Таким образом, в конце концов большинство электронов оказывается на подуровне основного состояния, соответствующем наибольшему m , в связи с чем фотони начинают свободно проходить через сосуд, заполненный газообразным рубидием, причем прозрачность последнего соответственно возрастает.

«Встряхивание» газообразного рубидия медленно меняющимся магнитным полем разрушает создавшуюся ситуацию и позволяет вновь начаться процессу высвечивания. Если теперь менять частоту магнитного поля и следить за пучком света, проходящего через сосуд с газообразным рубидием, окажется, что при частоте, приблизительно соответствующей равенству $f = 4,6674 \text{ Гц}$, поглощение становится особенно сильным. Здесь f — частота света для Rb^{85} (в герцах) и H — интенсивность магнитного поля (в гаммах).

Дело в том, что электроны, совершающие переходы между различными энергетическими уровнями, прецессируют с ларморовой частотой

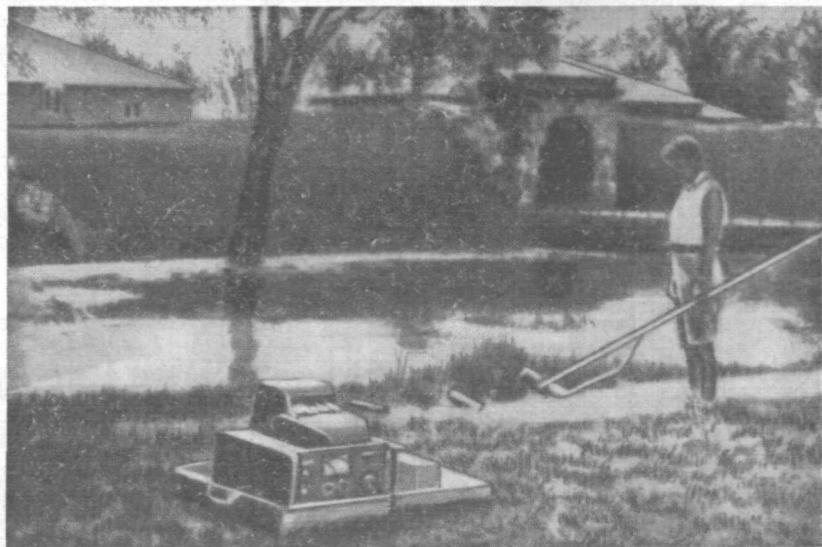


Рис. 2. Рубидиевый дифференциальный магнитометр во время работы у Форта Ленокса, Квебек. Оборудование слева осуществляет запись с цилиндрических датчиков, расположенных у земли и на другом конце стержня, который оператор держит в руке.

(определенной эффе́ктом расщепления Зеемана) вокруг направления магнитного поля (см. рис. 1).

Отметим, что в отличие от протонного магнитометра, в котором раз в 4—6 сек создается прецессия с частотой примерно 2000 Гц, рубидиевый магнитометр работает непрерывно, и характерная для него ларморова частота составляет приблизительно 233 000 Гц.

Для обнаружения модуляции прошедшего пучка света в реально существующих приборах употребляется фотоэлемент, ток от которого после усиления и инверсии по фазе используется в качестве сигнала обратной связи, необходимого для создания меняющегося магнитного поля вокруг сосуда с газообразным рубидием. Это устройство, таким образом, представляет собой осциллятор, частота которого пропорциональна интенсивности полного магнитного поля, причем константа пропорциональности фиксирована и равна 4,667 Гц/гамма. Сигнал, поступающий от этого осциллятора, затем смешивается с сигналом другого осциллятора, частота которого постоянна; возникающему в результате подобного смешивания сигналу соответствует частота, лежащая в звуковом диапазоне и также пропорциональная интенсивности поля. Этот сигнал обычно либо усиливается до уровня, при котором возможно его

непосредственное слуховое восприятие, либо же с помощью частотного дискриминатора преобразуется в напряжение, колебания величины которого затем вычерчиваются на бумаге в виде диаграммы. Общий вид прибора, употребляемого в полевых условиях, приведен на рис. 2.

МАГНИТНЫЕ АНОМАЛИИ, ВЫЗЫВАЕМЫЕ АРХЕОЛОГИЧЕСКИМИ ПРЕДМЕТАМИ

Успешное применение магнетометра к археологическим исследованиям в основном связано с тем обстоятельством, что напряженность магнитного поля на месте локализации археологически интересных предметов обычно заметно меняется. Целью археолога является, таким образом, во-первых, обнаружить эту аномалию магнитного поля и, во-вторых, понять, действительно ли она вызывается предметом, представляющим хотя бы потенциальный археологический интерес. На последний вопрос часто оказывается особенно трудно ответить. Дело в том, что высоко чувствительный магнетометр на некоторых почвах может обнаружить слишком много всевозможных аномалий и пренебрежение попытками интерпретации природы каждой из них может привести лишь к конфузу. В литературе содержится очень мало сведений относительно магнитных изысканий в археологии; кроме того, в настоящее время магнитные характеристики известны лишь для небольшого числа структур. Поэтому прежде чем описать метод исследований, я остановлюсь на причинах, порождающих особенно сильные магнитные аномалии.

Прежде всего подобные аномалии всегда присутствуют в любом месте, на котором когда-либо находилось человеческое жилище; они обычно обязаны своим возникновением обломкам железных предметов. Однако польза от магнетометра не ограничивается указанием мест, в которых находится железо; напротив, эти находки обычно представляют наименьшую ценность, так как они скорее всего относятся к сравнительно недавнему прошлому и бывают обычно закопаны на небольшой глубине, так что место их захоронения можно обнаружить и непосредственно; кроме того, эти предметы обычно легко идентифицируются при изучении письменных источников.

Несколько менее заметные магнитные аномалии вызываются различиями между магнитными свойствами всевозможных материалов, связанных с человеческим существованием, и магнитными свойствами почвы, воды или горной породы, которая их покрывает. Магнитные свойства веществ, образовавшихся на месте человеческого жилища, в значительной степени поддаются количественной оценке, что одновременно дает возможность проследить, какие механические и термические воздействия испытывали содержащиеся в этих веществах магнитные минералы (в особенности магнитный железняк). В общем случае, если считать, что количество магнетита есть мера магнитной восприимчивости K на единицу объема, то K можно определить по формуле

$$K = \frac{I}{H},$$

где I есть интенсивность намагничивания в приложенном магнитном поле H , т. е. в данном случае в поле земного магнетизма. По определению, K есть мера способности данного вещества концентрировать магнитный поток. Типичное значение K для археологически интересных материалов есть (в электромагнитных единицах метрической системы) $5 \cdot 10^{-6}$ для известняка, $1 \cdot 10^{-5}$ для песчаника, $5 \cdot 10^{-4}$ для гранита, $20 \cdot 10^{-4}$ для почвы, богатой перегноем⁸, $20 \cdot 10^{-4}$ для базальта и, наконец, почти $1,0$ для магнитного железняка и свыше 10 для железа⁹. Отсюда ясно,

что осколки базальта, закопанные в песке, будут вызывать локальное увеличение интенсивности магнитного поля. С другой стороны, наличие стены из песчаника, покрытой почвой, богатой перегноем или же насыщенной магнитным железняком, будет давать уменьшение интенсивности магнитного поля в том месте, где эта стена проходит. Так как магнитная восприимчивость воздуха равна нулю, то, например, гробница в скале вулканического происхождения (т. е. в базальтовой скале) может быть обнаружена благодаря явлому отсутствию магнитного потока.

Эти примеры поучительны в том смысле, что они позволяют сооп-
оставить влияние различных материалов на интенсивность магнитного поля, фиксируемую магнетометром, но следует учесть, что описание физи-
ческой ситуации сильно упрощено.

Особенно важным свойством, которое явилось причиной целого ряда магнитных аномалий, обнаруженных в настоящее время, является свой-
ство, называемое остаточным магнетизмом¹⁰.

Дело в том, что величина и направление остаточного магнетизма никак не связаны с интенсивностью земного магнетизма в настоящее время, причем остаточное магнитное поле обычно много сильнее, чем поле, возникающее благодаря явлению магнитной восприимчивости.

Остаточный магнетизм особенно присущ предметам гончарного про-
изводства, горнам, глиняным печам для обжига и сушки, а также обож-
женной горной породы. Остаточное магнитное поле возникает, когда порода, содер-
жащая некоторые магнитные минералы, охлаждается после нагре-
вания до достаточно высокой температуры, т. е. до температуры больше
точки Кюри. В процессе охлаждения многие домены выстраиваются па-
раллельно окружающему полю (или магнитному полю Земли) и затем так и остаются в этом положении. Так как домены выстроены па-
раллельно окружающему полю, то их магнитные моменты параллельны друг
другу, благодаря чему и возникает остаточное магнитное поле. Печи,
которые оставались нетронутыми со времени их последнего обжига, будут
создавать довольно значительную магнитную аномалию. Даже если
впоследствии сами предметы обжига (например, осколки черепичной
кровли или кирпичи) в результате случайных причин были переориенти-
рованы по отношению к своему первоначальному положению и оказались
захороненными под небольшим слоем почвы, их остаточный магнетизм
все еще можно измерить.

Действительно, так как направления и напряженности остаточных магнитных полей, создаваемых этими предметами, различны и так как, кроме того, сами предметы находятся на разных расстояниях от точки, где производятся измерения, совершенно невероятно, чтобы соответствующие поля взаимно скомпенсировали друг друга. Отметим, что магнитная восприимчивость, которая не меняется при изменении ориен-
тации предметов, также вносит свой вклад в величину магнитной ано-
малии. То, что археологически интересные предметы, такие как гончар-
ные изделия, кирпичи, осколки черепичной крыши и т. д., обладающие особыми магнитными свойствами, являются еще и хорошо сохраняю-
щимися остатками древних цивилизаций, представляет собой весьма удачное совпадение.

ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Рубидиевый магнетометр в фиксированном положении может уловить изменение приблизительно на 0,002 гамма в поле 50 000 гамма. Если бы прибор использовался обычным образом, то столь высокая чувстви-
тельность производила значительную путаницу при регистрации поля

на месте археологических изысканий. Основными источниками помех являются микропульсации от ионосферы и геологические образования, обладающие аномальными магнитными свойствами и лежащие вблизи или ниже археологического (культурного) слоя. Таким образом, чтобы полностью использовать возможности этого устройства, следует понимать природу обоих источников помех.

Наблюдаемое на земной поверхности магнитное поле на 95% обязано своим существованием относительно стабильным источникам, находящимся в ядре Земли. Остальные 5% происходят от вызванных солнечной активностью токов и связанных с этими токами магнитных полей в ионосфере и в земной коре¹¹. Вариации поля, связанные с ионосферными

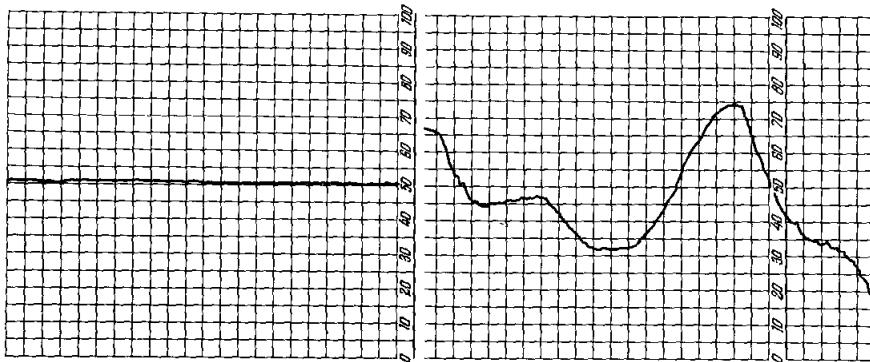


Рис. 3. Записи магнетометра из района Сибариса, сделанные когда оба датчика находятся в фиксированном положении. Длина оси ординат соответствует 1 гамма, длительность каждой записи 75 сек. Слева: запись типичных дневных микропульсаций, полученная на одном датчике. Справа: запись с дифференциального магнетометра, сделанная при той же активности; временные пульсации почти полностью исчезли.

источниками (или микропульсациями) происходят за периоды длительностью от долей секунды до многих часов и имеют амплитуды до десятков и даже сотен гамма во время магнитных бурь. Эти вариации по форме, амплитуде и частоте сходны с вариациями, которые отмечаются магнетометром при его перемещении над подземными неоднородностями. Малые микропульсации, которые почти всегда присутствуют в дневные часы, показаны на рис. 3 (слева) и виде записи фиксированного воспринимающего элемента (датчика) в районе археологических изысканий.

Магнетометр чувствует только величину полной интенсивности *) и потому не дает информации о направлении, в котором находится источник регистрируемого возмущения поля. Поэтому, наблюдая аномалию при перемещении прибора, мы не имеем возможности непосредственно определить, вызвана эта аномалия неоднородностями грунта или просто микропульсациями от ионосферы.

Пространственные неоднородности магнитного поля, связанные с неоднородностью геологических формаций, вызваны главным образом различием в содержании магнетита в глубинных скальных породах. Резкие и очень сильные (до тысяч гамма) изменения поля вызываются поверхностными выходами или лежащими близко к поверхности скоплениями пород с высоким содержанием магнетита. Если изменения плавные и не превосходят сотен гамма, их источниками могут быть, вообще говоря,

*) Рубидиевый и протонный магнетометры измеряют только величину полной интенсивности магнитного поля, скаляр, и потому ориентация датчика не имеет значения.

содержащие магнетит скальные породы вулканического происхождения, залегающие на глубинах от 1 м до многих км.

Рубидиевый магнитометр должен либо работать как обычный магнитометр с ограничением полезной чувствительности в пределах, о которых шла речь выше, либо он должен использовать некоторым особым способом, который позволил бы отличить влияние ионосферы и глубоколежащих геологических формаций от интересующих нас эффектов. По имеющимся данным рубидиевый магнитометр при работе в полевых условиях является полезным как для использования в качестве обычного одноканального магнитометра, так и в специальной двухканальной схеме, обеспечивающей компенсацию помех. Во-первых, отдельный датчик может быть использован как обычный магнитометр, но работающий при разрешении, например, 0,1 гамма. Способность прибора работать непрерывно позволяет перемещать его с большой скоростью по исследуемому участку. При этом подземные аномалии археологического происхождения дадут более быстрые колебания, чем низкочастотные микропульсации с той же амплитудой.

Второй способ работы использует сравнительно высокое отношение частоты к интенсивности ($5 \text{ Гц}/\text{гамма}$), характерное для рубидиевого осциллятора. Работая с одним датчиком и слушая соответствующий звуковой сигнал, оператор может улавливать изменения интенсивности поля больше 1 гамма. Разрешающая способность ограничивается только способностью человеческого уха разрешать и запоминать частоты. Хотя этот метод не допускает количественных наблюдений, он достаточно чувствителен для обнаружения обломков магнитных пород или изолированных близких к поверхности неоднородностей или же для быстрого прослеживания подземных линейных структур.

В случае необходимости рубидиевый магнитометр может также успешно использоваться в качестве дифференциального измерителя, если использовать два датчика, один в зафиксированном положении, а другой — подвижный, соединив их кабелем. Микропульсации, улавливаемые обоими датчиками, расположеными на расстоянии до километра друг от друга, почти идентичны, так как они происходят из ионосферы, удаленной на сотни километров. Таким образом, когда подвижный датчик перемещается по обследуемому участку и регистрируется разность между его сигналом и сигналом неподвижного датчика, то наблюдаемый эффект обусловлен подземными аномалиями, над которыми проходит подвижный датчик. Записи, полученные описанным способом, были использованы при составлении карт экспедицией, исследовавшей Сибарис. Эти карты описаны ниже. Для иллюстрации эффективности такого метода устранения помех можно сравнить запись микропульсаций с одним неподвижным датчиком с записью разности показаний обоих датчиков, находящихся в фиксированном положении (см. рис. 3).

Другим вариантом этой дифференциальной схемы является использование обоих датчиков, соединенных твердым стержнем, в качестве подвижного прибора. Эта конфигурация обычно называется «радиометром», так как таким способом измеряется разность интенсивностей в двух точках, разделенных определенным интервалом, т. е. градиент. При этой конфигурации достигается даже лучшее уничтожение микропульсаций, чем в описанной перед этим схеме, а необходимость в длинном соединительном кабеле отпадает. Но, что важнее всего, радиометр отфильтровывает некоторые фоновые аномалии, происходящие от глубоколежащих геологических слоев.

Чтобы понять, как это получается, следует сначала рассмотреть, какие же величины непосредственно измеряются каждым датчиком

в отдельности. Пусть ΔI — превышение удельной намагниченности в подземной неоднородности над средним уровнем (например, погребенный в иле кусок стены). Тогда, в общем случае, рассматривая источник поля как магнитный диполь, получаем для магнитной напряженности формулу

$$H = A \frac{\Delta I}{r^3},$$

где r — среднее расстояние до точки измерения и A — фактор, зависящий от размера, формы и ориентации источника. Значение множителя r^{-3} очевидно, если мы сравним магнитную аномалию в обоих датчиках от погребенной стены с аномалией, вызванной глубоколежащими геологическими неоднородностями. Предположим, что оба датчика находятся прямо над стеной на расстоянии от нее 1 и 2 м соответственно, а геологический источник поля на 10 м ниже. Тогда даже если интенсивности от этих двух источников одного порядка в точке расположения нижнего датчика, дифференциальная аномалия от стены будет в четыре раза больше фона от геологической неоднородности. Это несколько преувеличенный случай, но применимость описанного принципа проверена практической работой в Сибарисе.

Для успешной работы градиометра необходимы датчики с очень высокой чувствительностью, способные измерять малые различия в силе поля на концах прибора. Кроме того, градиометр оказался очень эффективным как раз при выделении аномалий, вызванных близкими к поверхности источниками, на фоне всегда присутствующих геологических неоднородностей. Указанных причин достаточно, чтобы доказать исключительную ценность рубидиевого магнетометра для работы в местах, труднодоступных для исследования другими методами. Эти утверждения будут проиллюстрированы описанием некоторых испытаний, проделанных к настоящему времени.

СИБАРИС

Археологические исследования, использующие рубидиевый магнетометр, были впервые проведены совместно Центром по использованию прикладных наук в археологии (ASCA) при музее Пенсильванского университета и фирмой, разработавшей магнетометр. Эти испытания были выполнены в районе Форт Ленокс (провинция Квебек) на острове Иль-о-Нуа на реке Ришелье и осуществлялись совместно с канадским Управлением по делам Севера (см. рис. 2). Сравнительно плоский и покрытый илом остров содержит структуры, представляющие исторический интерес. Как и ожидалось, там имеется также большое количество обломков железистых пород. Тем не менее различные схемы работы прибора, описанные выше, были испробованы с успехом, достаточным для обоснования более реальной и долгостоящей программы исследований в местах, содержащих более сложные аномалии¹².

Место было выбрано, и в 1964 г. фирма Вэрайн была приглашена принять участие в ASCA в программе исследований района Сибариса в провинции Калабрия на юге Италии (рис. 4). Где-то под плоской равниной, возможно, лежит греческий город Сибарис, основанный в 720 г. до н. э., одно из наиболее ранних поселений Великой Греции*). Сибарис славился в древности своим богатством и роскошью (благодаря такой репутации города слово «сибарит», т. е. житель Сибариса, стало

*.) Великая Греция — совокупность поселений на юге Апеннинского п-ва и в Сицилии, основанных греческими колонистами в VIII—VI веках до н. э. (Прим. перев.)

нарицательным) и был описан рядом классических авторов¹³. Но, несмотря на эти описания города и места, где он находился, его репутацию и важность его роли в истории, развалины города остаются погребенными под слоем ила и глины толщиной от 3 до 6 м в долине рек Крати и Кошиле. Определение размеров и точного местоположения Сибариса представляется крайне трудным делом, в первую очередь из-за того, что эта область является медленно опускающейся прибрежной равниной, покрытой за 2500 лет приливными отложениями, уничтожившими всякие внешние признаки, которые могли бы быть видны на поверхности. Опускание

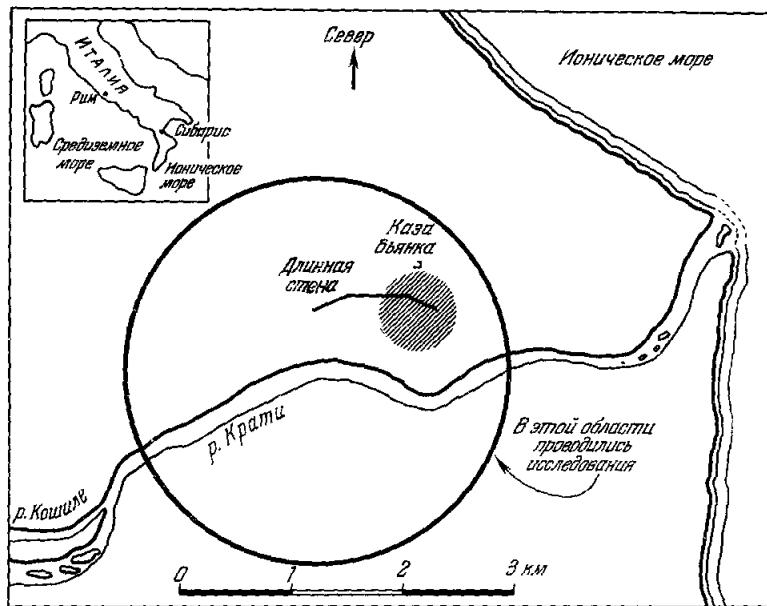


Рис. 4. Возможное положение порта Сибариса. Штриховкой обозначен район, обследованный рубидиевым магнетометром.

почвы и, как результат, образование малярийных болот являются возможной причиной того, что греки в конце концов покинули эти места. Землеройные работы чрезмерно усложняются весьма высоким уровнем грунтовых вод — всего 1—2 м от поверхности. Даже раскопки обнаруженных структурных неоднородностей не дают гарантии, что Сибарис найден, так как на том же месте, возможно, были построены более поздние греческие и римские города.

Трудность обнаружения Сибариса становится более очевидной, если принять во внимание, что развалины города, которые могли занимать площадь около 3 км², следовало искать на пространстве площадью свыше 250 км². В поисках города было проведено выборочное бурение. Этот метод привел к большому успеху: впервые были обнаружены греческие гончарные изделия времен существования Сибариса¹³. Были испробованы также измерения электропроводности почвы, однако они дали ничтожные результаты из-за высокого уровня грунтовых вод. Между тем магнитные наблюдения, сделанные с помощью протонного магнетометра, оказались чрезвычайно успешными при определении контуров массивной стены длиной свыше 1100 м, верхний край которой находится на глубине от 1 до 3 м, а основание — на глубине 5 м^{4,12-14} (рис. 5). Эта массивная стена была легко обнаружена протонным магнетометром.

Так как магнитные измерения оказались полезными, а для обнаружения более глубоких (и более древних) греческих стен и других следов цивилизации была необходима более высокая чувствительность, то было решено, что равнина Сибариса послужит идеальным полигоном для испытания рубидиевого магнетометра.

В октябре 1964 г. под общим руководством Фрелиха Рэйни, директора университетского музея, рубидиевый магнетометр был доставлен на место для всесторонних испытаний различных модификаций прибора. Элизабет Ральф, помощник директора ASCA, и я проводили наблюдения

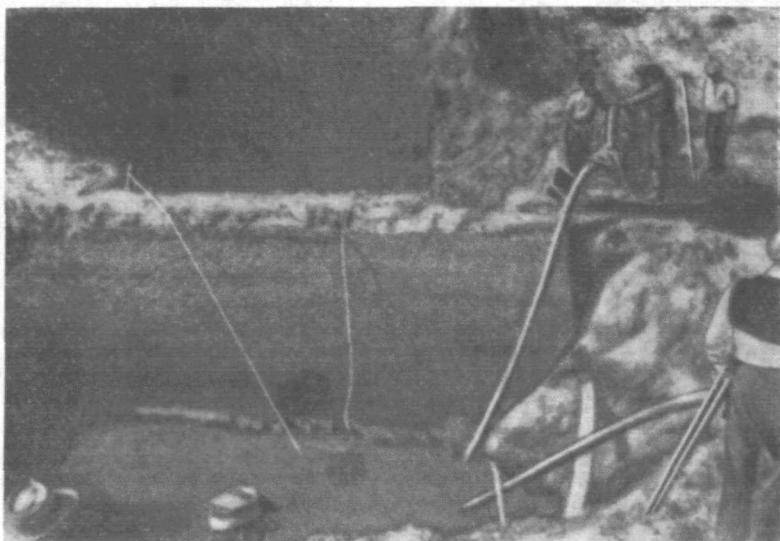


Рис. 5. Раскопки длинной стены, которая была обнаружена с помощью протонного магнетометра. Римская стена была сооружена поверх греческой, которая видна как раз над уровнем воды.

вблизи известных участков ранее обнаруженной стены. Сначала мы просто работали с одним датчиком на мощности батареи для карманного фонаря, подавая акустический сигнал на маленький громкоговоритель. В течение примерно двух часов оператор с магнетометром пересекал в обоих направлениях 400-метровый отрезок стены, и сигналы с прибора позволяли нам «слышать» стену при каждом пересечении. Это было в основном то же самое, что делалось ранее с протонным магнетометром. Однако на этот раз измерения были сделаны быстрее и надежнее, так как мы могли непрерывно слышать изменения и немедленно прослеживать соответствующие места для того, чтобы исключить возможный эффект от больших камней, находящихся вблизи поверхности. При последующих пересечениях магнетометром аномалии они наносились для сравнения на схему.

Мы выбрали участок 90×120 м на лугу за восточным концом нанесенного на карту отрезка длинной стены (см. рис. 4). Этот участок был удобен для детального обследования, которое проводилось по линиям, образовавшим сетку. Датчик перемещался ассистентом, который ходил между кольями, расположенными так, что они образовывали сетку, покрывавшую участок (рис. 6). Кабель соединял этот датчик с находившимся на расстоянии 150 м аппаратом, который осуществлял смешение сигналов от двух датчиков и запись. Другой датчик, используемый для устранения

фона, помещался на земле и был также присоединен кабелем. С помощью этой схемы мы получили результаты в виде записи на бумажной ленте,

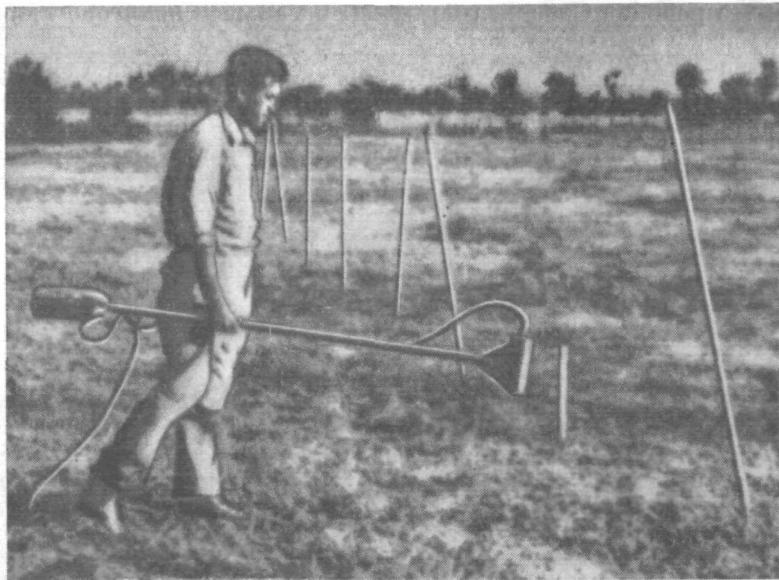


Рис. 6. Начало работы с рубидиевым магнитометром в 16-м секторе района изысканий. Здесь имеется комплекс подземных структур на глубине от 3 до 6 м.

отрезок которой показан на рис. 7. Эти данные были затем представлены в виде контурной карты, на которой нанесены линии, соединяющие точки

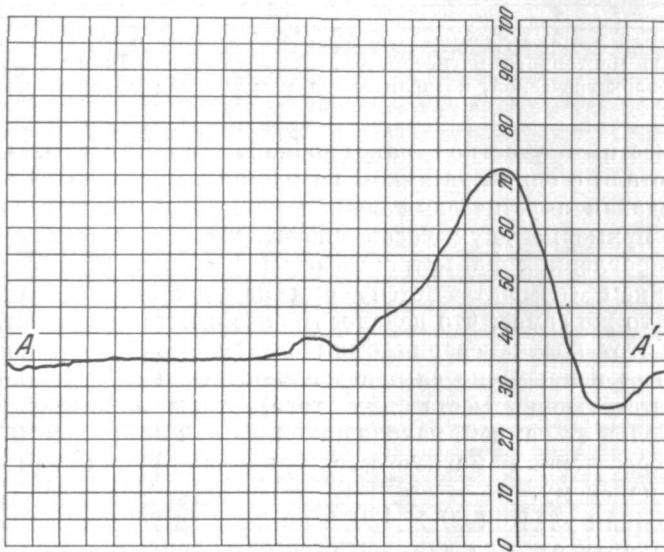


Рис. 7. Показания дифференциального магнитометра, снятые над большой аномалией в 16-м секторе (100 условных единиц соответствуют 30 гамма).

с одинаковой интенсивностью поля (рис. 8, слева). Позднее были использованы геофизические сверла, которые дали пробы грунта, подтвердившие

присутствие неоднородностей, на которые указывали наши данные, и показавшие, что в других местах ничего интересного не было. Эти пробы обнаружили куски кирпича и черепицы, извести, костей, стекла, а также раскрашенные глиняные черепки на глубине от 3,5 до 5,5 м (см. рис. 8).

Аномалии были, как правило, намагничены либо значительно сильнее, либо несколько слабее, чем ил и глина, в которых эти аномалии находились. Было найдено, что восприимчивость осадочных пород приблизительно составляет $4 \cdot 10^{-4}$ электромагнитных единиц, а восприимчивость

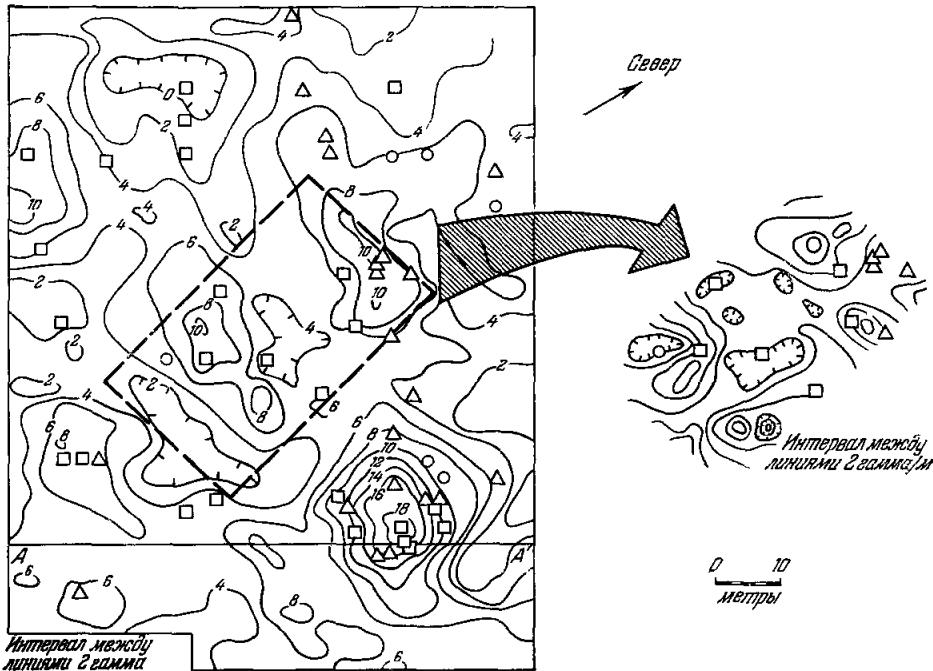


Рис. 8. Магнитные контурные карты (16-й сектор; зона Каза Бьянка, равнина Сибиря, октябрь 1964 г.), снятые над комплексом развалин, и результаты бурения. Слева: распределение полной интенсивности. Справа: распределение разностей двух измерений, сделанных на высоте 0,5 м и 1,5 м над поверхностью на участке, соответствующем прямоугольнику, выделенному на левой карте пунктирной линией. Обозначения: кружок — результатов нет, квадрат — сверло наткнулось на стену, треугольник — ощущается наличие крошащихся материалов.

кирпича или черепицы — около $40 \cdot 10^{-4}$ единиц¹². Наиболее явные аномалии, — например, очень большая аномалия в северо-восточном углу участка — были, возможно, вызваны скоплениями обожженной глины в виде черепицы, кирпичей или больших количеств глиняных черепков. Сама длинная стена была сооружена из очень слабо магнитного песчаника и была погребена под более сильно намагниченными и довольно однородными слоями ила, глины и песка. Этот тип неоднородности регистрируется как слабая отрицательная аномалия. Если греческие постройки были сооружены из материалов, менее магнитных, чем материалы, которыми пользовались римляне, то этот тип аномалий имел бы серьезное значение. Может быть благодаря этому признаку и исследованиям глубоких слоев с помощью магнитных карт и небольшого числа контрольных шурфов магнитные измерения смогли бы помочь нам отличить римские постройки от греческих, если, конечно, они не сооружены точно на том же месте.

Использование вертикального градиометра для изучения аномалий в этом районе представляет специальный интерес из-за его высокой разрешающей способности и так как поверхность земли в этом месте отличается отсутствием магнитных пород. Однако по техническим причинам в то время не было возможности провести непосредственные наблюдения с градиометром. Мы не обладали электронным оборудованием, которое могло бы работать на весьма малой разности сигналов от двух близко

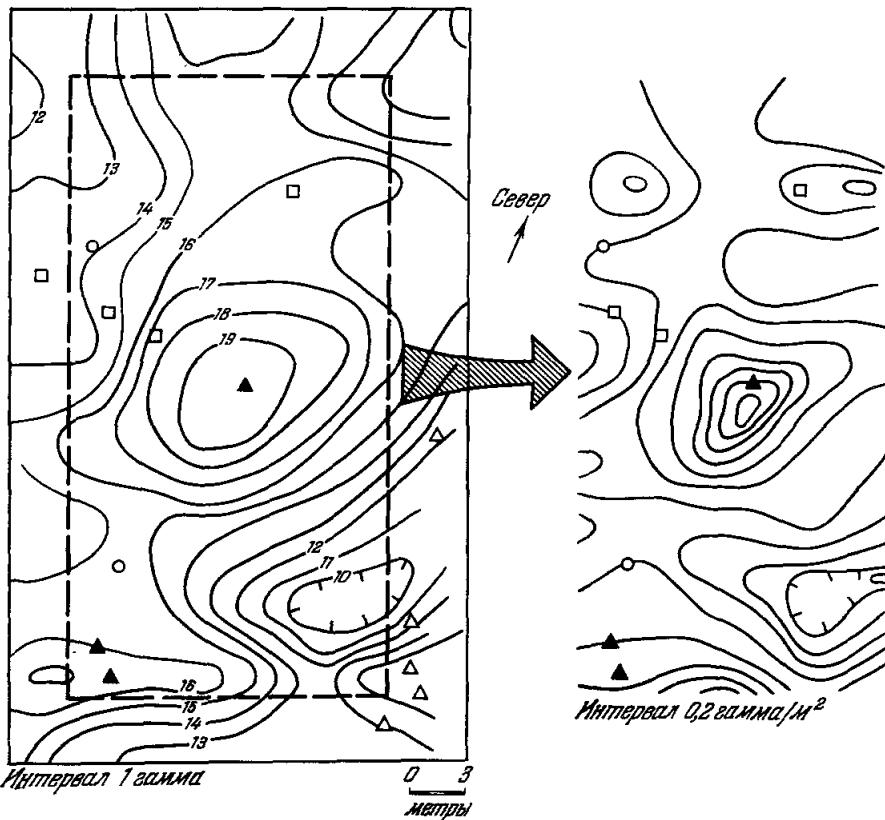


Рис. 9. Слева: схема распределения полной интенсивности над развалинами, погребенными на глубинах от 3,5 до 6 м (15-й сектор; зона Каза Бьянка, октябрь 1964 г.), и результаты бурения. Справа: распределение вычисленной второй производной на участке, выделенном пунктирной линией слева. Кружок — результатов нет; квадрат — сверло наткнулось на стену; светлый треугольник — крошающиеся материалы (глиняные черепки); черный треугольник — сверло остановилось, много черепков.

расположенных датчиков градиометра. Вместо использования градиометра мы сделали опыт второй раз, измерив поле на другом уровне, и нанесли на схему разность двух измерений, как если бы данные снимались одновременно. Часть этой схемы показана на рис. 8 (справа). Увеличение разрешающей способности по сравнению со схемой на рис. 8 слева (центральная часть) очевидно, если сравнить плавно очерченные аномалии на схеме, изображающей распределение полной интенсивности, с более детальными контурами на разностной схеме.

Вблизи участка, изображенного на рис. 8, был выбран другой меньших размеров. Этот участок был обмерен в течение нескольких часов. Полученная схема (рис. 9, слева) менее сложна, чем предыдущая (рис. 8).

Стоял вопрос: «Где бурить?». После предварительной оценки, основанной на горизонтальной скорости изменения интенсивности (места на схеме, в которых линии расположены наиболее густо), были выбраны точки для взятия проб. Сверление не только выявило структуру стены, на которую указывал магнитометр, но даже подтвердило наши выводы о высоте стены и ее центральной части. Чтобы получить еще большее разрешение, по первоначальной карте была построена схема градиента от градиента, т. е. второй производной в вертикальном направлении полной интенсивности поля (см. рис. 9, справа *). Такая схема похожа на карту вертикального градиента (см. рис. 8, справа) и фактически может быть получена аналогичным образом из измерений на трех уровнях, если наносить на нее разность двух вертикальных градиентов, вычисленных по верхней и по нижней паре измерений. Таким способом выясняется структура отдельных источников, создающих в совокупности более обширные аномалии; например, на нашей схеме видно наличие по меньшей мере трех аномалий, незаметных на первоначальной схеме, изображающей распределение полной интенсивности поля.

Примеры обратного метода интерпретации были даны Лайнингтоном⁴ в отчете о магнитных исследованиях этрусских захоронений. В своем анализе он каждую могилу, входящую в комплекс захоронений, представляет в виде диполя эквивалентной площади, суммирует эффекты отдельных могил и сравнивает результат с картой магнитных наблюдений. Из его результатов, как и из карт, снятых на равнине Сибариса, следует, что магнитное поле над смешанными магнитными структурами бывает на самом деле весьма сложным по форме, но тем не менее при надлежащем подходе интерпретация его может быть сделана.

После успешного выполнения испытаний на равнине Сибариса мы были приглашены испробовать магнитометр в другом месте, представляющем интерес для археологии, в районе этрусских захоронений в Центральной Италии. По просьбе К. М. Леричи из Фонда Леричи в Риме мы использовали нашу технику для изучения комплекса развалин Черветери и Тарквииции (Италия). Наши данные подтвердили результаты, сообщенные ранее Лайнингтоном⁴ и полученные при тщательном изучении этих мест.

ПОДВОДНАЯ АРХЕОЛОГИЯ

С целью продемонстрировать эффективность рубидиевого магнитометра в подводных археологических исследованиях прибор использовался водолазом на месте крушения римского корабля вблизи Кампо Марина на Ионическом побережье Италии **). Основной целью, пока еще не достигнутой, было найти глиняные черепки или же амфоры в иле вблизи уже известного места кораблекрушения и обнаружить новые мраморные саркофаги, которые, как известно, имеются в иле.

Более обширные подводные испытания были позднее проведены в заливе Дрейка у Калифорнийского побережья при поддержке Совета

*) Вторая производная по вертикали была рассчитана по контурной карте с помощью уравнения Лапласа, которое связывает вторые производные по всем трем направлениям:

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0.$$

Первые два члена вычислялись в каждой точке на 3-метровой сетке по значениям в соответствующих узлах сетки. Сходные результаты могут быть получены из теоремы о среднем. Изменение размеров сетки дает фильтрацию, отделяющую аномалии разных размеров. Эти методы могли бы оказаться весьма плодотворными при изучении таких мест, как равнина Сибариса, см., например,¹⁵.

**) Исследование проводилось под руководством Питера Трокмортон (см.¹⁶).

подводной археологии. Этому Совету и Управлению национальных парков было желательно получить больше сведений о возможном наличии в заливе исторических останков кораблей, в особенности «Св. Августина» (затонувшего в 1595 г.), а также, если удастся, найти на месте вещественное доказательство посещения этого пункта Калифорнийского побережья сэром Френсисом Дрейком *). Датчик был заключен в водонепроницаемую оболочку и либо буксировался позади лодки на поверхности воды, либо использовался водолазом на глубине 8 м под водой. Результаты

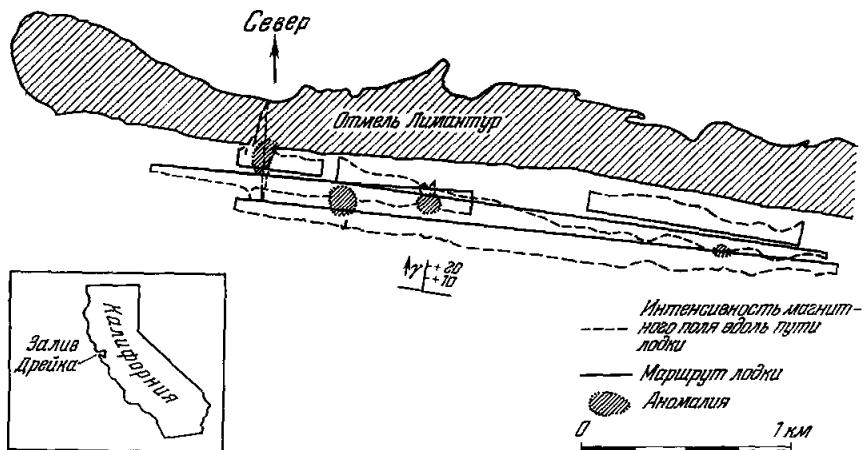


Рис. 10. Профили полной интенсивности магнитного поля в заливе Дрейка, у Калифорнийского побережья; в заливе имеются останки по крайней мере нескольких современных судов. Измерения проводились рубидиевым магнетометром, буксируемым позади лодки.

нескольких измерений, выполненных при движении вдоль берега, указали на эффект, вероятно, обусловленный железными обломками кораблей, может быть, недавнего происхождения, находящимися вблизи берега у линии прибоя (рис. 10) ¹⁷.

Хотя протонные магнетометры с успехом применяются в археологических изысканиях с 1958 г. для обнаружения неоднородностей, связанных с керамическими материалами, захоронениями и засыпанными стенами, создается впечатление, что многие места могут быть более тщательно и с лучшим разрешением исследованы при помощи рубидиевого магнетометра — прибора, работающего непрерывно и обладающего высокой чувствительностью. В некоторых случаях требуется другая техника, включая использование градиометра или дифференциального магнетометра, что позволило бы выделить весьма мелкомасштабные аномалии. Даже после того как данные нанесены на схему, для придания им большей определенности можно применить какие-либо геофизические методы. В исследовании равнины Сибариса описываемая техника особенно полезна, на самом деле даже необходима с экономической точки зрения, так как она в принципе позволяет археологу получить определенное представление об общем плане города прежде, чем приниматься за обширные раскопки.

Недавно фирма Вэрайан Ассошиэйтс разработала для археологических исследований более портативный вариант рубидиевого магнетометра,

*) Френсис Дрейк (1545?—1595) — английский мореплаватель и пират, сыграл важную роль в исследовании Америки. Впервые после Магеллана совершил кругосветное путешествие. (Прим. перев.)

чем тот, который использовался в 3 описанных работах¹⁸. Результатом широкого использования явления магнетизма в археологии является составление подробных карт многих мест, представляющих интерес, и появление тонкой научной техники. К сожалению, наиболее сложные приборы, такие как рубидиевый магнитометр, сейсмическое оборудование и другие геофизические приборы, до сих пор, прежде чем оказаться в распоряжении археологов, проявляли свои высокие качества в других областях. Возможно, следующая новинка будет изобретена специально для археологии.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. J. Aitken, Physics and Archaeology (Interscience, London, 1961).
2. M. E. Packard and R. H. Varian, Phys. Rev. **93**, 941 (1954).
3. M. J. Aitken, G. Webster, H. Reeves, Antiquity **32**, 270 (1958); R. B. Johnson, Prehist. Rev. Scr. Indiana Hist. Soc. **4** (11) (1964).
4. R. E. Lington, Quaderni Geofis. Appl. **22**, 12 (1961).
5. H. G. Dehmel, Phys. Rev. **105**, 1487, 1984 (1957).
6. R. L. de Zafra, An. J. Phys. **28**, 646 (1960); A. L. Bloom, Sci. Am. **196**, 72 (Oct. 1960); App. Opt. **1**, 61 (1962).
7. Varian Associates, V-4938 Rubidium Magnetometer Data Sheet (Palo Alto, Calif., 1963).
8. E. Le Borgne, Ann. Geophys. **11**, 399 (1955).
9. J. J. Jakowczyk, Exploration Geophysics (Trija, Los Angeles, 1950), стр. 165.
10. T. Nagata, Rock Magnetism (Maruzen, Tokyo, 1961), стр. 144.
11. S. Chapman and J. Bartels, Geomagnetism (Oxford Univ. Press, Oxford, 1962) **1**, 194.
12. E. K. Ralph, Archaeometry (в печати).
13. D. F. Brown, Expedition **5** (2), 40 (1963) (bulleten of the University Museum, University of Pennsylvania).
14. E. K. Ralph, Expedition **7** (2), 4 (1965).
15. R. G. Henderson and I. Lietz, Geophysics **14**, 508 (1949).
16. P. Throckmorton, Expedition **7** (2), 1 (1965).
17. S. Breiner and R. C. MacNaughton, The application of magnetometers to underwater archaeology. Статья представлена на конференцию по подводной археологии, Торонто, 15 апреля 1965 (в печати).
18. L. Langman, Use of new atomic magnetometers in archaeology. Представлено на симпозиум «Успехи археологии», Рим, 13 апреля 1965.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

В декабрьском выпуске нашего журнала (том 90, вып. 4) будут даны алфавитный и предметный указатели **всех** статей, опубликованных в УФН с 1962 по 1966 г. (тома 76—90). Вместе с указателем, помещенным в декабрьском выпуске 1961 г. (том 75, вып. 4), этот указатель охватывает все статьи, опубликованные в УФН с 1918 по 1966 г.