

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

53+930.26

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИКИ В АРХЕОЛОГИИ *)*М. Эйткин*

I

1. ВВЕДЕНИЕ

Археолог ставит перед собой задачу воссоздать социальную, экономическую и историческую жизнь прошлых цивилизаций с помощью тех немногих предметов материальной культуры, которые ему посчастливилось обнаружить. Поэтому он должен максимальным образом использовать все, что ему дают зрение, осязание и интуиция, а также призвать на помощь естественные науки и биологию для получения дальнейшей информации. Предлагаемая статья посвящена использованию физики в археологии. В первой части рассказывается о методах определения возраста и проведения химического анализа с помощью физических приборов. Во второй части описывается еще один метод определения возраста — магнитный метод, а также методы для отыскания местоположения ископаемых остатков, в основном с помощью протонного магнетометра.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА ПО СОДЕРЖАНИЮ
РАДИОАКТИВНОГО УГЛЕРОДА ^{14}C

Этот метод имеет огромное значение для исторической археологии, так как имеется разумное основание предполагать существование абсолютной шкалы времени, зависящей только от скорости радиоактивного распада ^{14}C . Метод возник в качестве побочного результата некоторых фундаментальных исследований в области физики и был развит далее У. Либби, который занимался им с 1946 г. ^{1, 2}. Дело в том, что при вхождении космических лучей в земную атмосферу рождаются нейтроны. Из лабораторного изучения всевозможных ядерных реакций, возникающих при использовании искусственно полученных нейтронов, Либби заключил, что почти все нейтроны, находящиеся в космических лучах, в конечном итоге будут превращать атмосферный азот ^{14}N в радиоактивный углерод ^{14}C , так как сечение рассеяния нейтронов на кислороде пренебрежимо мало по сравнению с сечением рассеяния нейтронов на азоте.

Поскольку химические свойства радиоактивного углерода и обычного углерода ничем не отличаются, образуется двуокись тяжелого углерода, которая смешивается с двуокисью обычного углерода, находящейся

*) М. J. A i t k e n, Physics Applied to Archaeology, Contemporary Phys. 3, 161, 334 (1962). Перевод и примечания В. Б. Мандельцвейга.

в атмосфере (в количестве примерно 0,04 вес. %). Так как для жизнедеятельности и роста растений необходимым условием является процесс фотосинтеза из атмосферы двуокиси углерода, а для жизнедеятельности животных необходимо потребление растений, и животных, и растительный мир (биосфера) обладают небольшой радиоактивностью.

Двуокись углерода из атмосферы в растворенном виде содержится и в океане, а поэтому океан, попадающие в него осадки, находящиеся в нем раковины и т. д. также являются слабо радиоактивными.

Скорость распада радиоактивного углерода такова, что каждые 82 года распадается 1% вещества, т. е. период полураспада радиоактивного углерода составляет 5800 лет. Средняя же скорость рождения радиоактивного углерода нейтронами космических лучей составляет 7—8 кг в год.

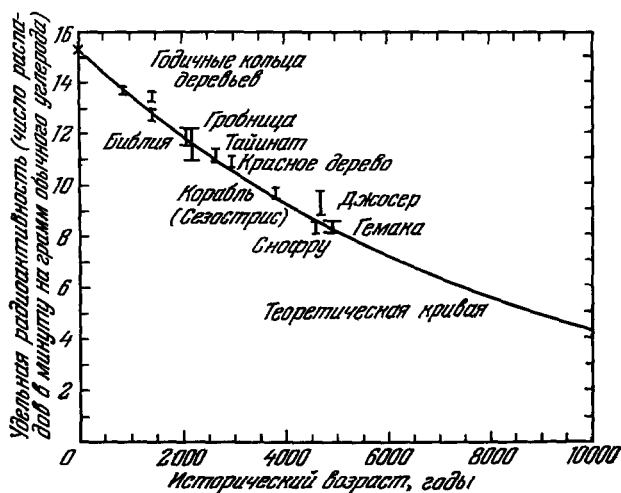


Рис. 1. Активность образца известного возраста (по Либби^{1, 2}).

Ширина каждого значка, указывающего возраст, по горизонтали соответствует неопределенности в историческом возрасте, в то время как высота значка связана со статистическими ошибками в скорости отсчета (число стандартных отклонений). Теоретическая экспоненциальная кривая представлена сплошной линией.

Эти две цифры указывают, что содержание радиоактивного углерода на Земле не меняется: недостача радиоактивного углерода, вызываемая его распадом, точно восполняется его рождением в атмосфере. Количество радиоактивного углерода, таким образом, составляет $7,5 \times 82 \times 100$ кг, т. е. 62 метрические тонны. Так как полное количество обычного углерода, в котором содержится радиоактивный углерод, равно примерно $4 \cdot 10^{13}$ тонн (с учетом содержания углерода в атмосфере, биосфере и океанах), отношение числа атомов ^{14}C к числу атомов ^{12}C составляет всего $\frac{1}{0,8 \cdot 10^{12}}$. Углерод, получаемый непосредственно из атмосферы, в надлежащей пропорции содержит ^{14}C . Однако, например, в мертвой древесине недостача ^{14}C , возникающая за счет его распада, не восполняется, в результате чего концентрация радиоактивного углерода медленно уменьшается — на 1% каждые два года. Благодаря этому, измеряя отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в куске омертвевшего дерева и сравнивая его с отношением $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ для живущего дерева, мы можем установить возраст омертвевшего дерева. Соответствующее вычисление базируется только на измеренной лабораторными методами скорости распада ^{14}C ; однако в целом идея метода осно-

выводится на предположении, что отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ для ранее живших растений и животных всегда было таким же, как и в настоящее время. Правильность этого предположения обсуждается в дальнейшем, но одно из первых подтверждений по крайней мере приближенного его соответствия действительности было получено Либби и его коллегами с помощью измерений возраста куска дерева, взятого из могилы египетского фараона Снофру, умершего, как это следует из исторических документов, приблизительно между 2700 и 2550 гг. до н. э.

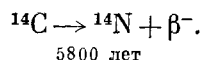
На рис. 1 показано, как эти и другие измерения, сделанные на образцах, возраст которых известен, согласуются с кривой радиоактивного распада ^{14}C .

Отсюда следует также, что отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ для живой материи не зависит от географической широты, хотя из-за наличия у Земли магнитного поля рождение нейтронов космическими лучами на экваторе вчетверо слабее, чем на полюсе. Это означает, что процессы циркуляции в атмосфере обеспечивают перемешивание, вполне достаточное для того, чтобы исключить сколько-нибудь значительную зависимость отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ от географической широты.

Из м е р е н и е

В живой материи отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ составляет всего $1/0,8 \cdot 10^{12}$, в то время как в археологических образцах оно уменьшается в два раза за каждые 5800 лет. Об измерении этого отношения масс-спектрометром не может быть и речи из-за близости атомных весов ^{14}C и ^{12}C . Однако это отношение можно измерить, если определить удельную радиоактивность, соответствующую весу углерода в образце.

Радиоактивный углерод ^{14}C распадается на стабильный азот ^{14}N с испусканием β -частицы:



К несчастью, энергия β -частицы составляет всего 160 кэв. Последнее означает, что пучок β -лучей сильно ослабляется при прохождении слоя воздуха толщиной один дюйм или алюминиевой пластинки толщиной 0,0003 дюйма. Итак, чтобы обнаружить β -излучение с помощью счетчика частиц, образец нужно поместить внутрь счетчика. Имеется несколько возможностей сделать это; одна из наиболее удобных — превратить углерод образца в двуокись углерода, чтобы использовать полученный после очень тщательной очистки газообразный продукт в качестве газа в пропорциональном счетчике. Можно также с успехом использовать превращение углерода в метан и ацетилен, синтезировав их в органическую жидкость, пригодную для употребления в качестве сцинтиллятора фотоумножителя. Отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, равное $1/0,8 \cdot 10^{12}$ в живой материи, соответствует излучению 15 β -частиц в минуту на грамм углерода, т. е. немного меньше 7 *мкюри/г*. Скорость распада образца, который имеет, скажем, возраст 23 000 лет (учетверенное время полураспада), равна одной шестнадцатой этой скорости. Объем обычного газового пропорционального счетчика равен примерно литру, причем давление газа в нем составляет несколько атмосфер. Таким образом, скорость счета для упомянутого образца будет не более одного или двух щелчков в минуту. Следовательно, в этом случае крайне важно ослабление фона счетчика. Часть фона обязана своим возникновением материалу, из которого сделан счетчик, однако большая часть фона возникает благодаря вторичным космическим лучам. Гамма-компонента космических лучей ослабляется

с помощью стального экрана толщиной 8 дюймов. Хотя эта преграда кажется достаточно основательной, она не в состоянии устранить мезонную компоненту. Мезоны исключаются посредством защиты в виде схем антисовпадения. Составной частью такой защиты является набор гейгеровских счетчиков, расположенных вокруг счетчика, измеряющего возраст образца.

Любой мезон, попавший в измеряющий счетчик, вызовет при этом импульс в одном из счетчиков Гейгера. Электроника же устроена таким образом, что импульс измеряющего счетчика, пришедший одновременно с импульсом счетчика Гейгера, не регистрируется.

Однако даже с использованием всех этих предосторожностей трудно сделать фон много слабее одной десятой скорости счета для углерода, извлеченного из живой материи. Следовательно, для достаточно старых археологических образцов скорость счета только немного выше фона; в результате этого время счета, необходимое для исключения эффекта статистических флуктуаций в скорости счета, составляет по крайней мере 24 часа.

Г о д н ы е о б р а з ц ы

Определение возраста изложенным методом возможно лишь в тех случаях, когда поступление углерода из атмосферы в образец отсутствует. Древесный уголь, хорошо сохранившаяся древесина являются наиболее подходящим типом образцов, так как обмен углеродом, заключенным в огромной молекуле целлюлозы, в отсутствие фотосинтеза крайне маловероятен. Это было доказано измерениями, проведенными на годичных кольцах деревьев: радиоактивность ^{14}C соответствовала времени формирования кольца; в соседних годичных кольцах присутствовал радиоактивный углерод другой активности. Образцы древесины и древесного угля, полученные из годичных колец медленно растущих деревьев (таких, как дуб или красное дерево), соответствовали возрасту, определенному по содержанию радиоактивного углерода, на несколько столетий большему, чем давало археологическое исследование дубленого дерева.

Торф, листья, орехи, волосы, шкуры, кожа, бумага, ткань, зубы, вишневые косточки и оленьи рога — возраст всех этих образцов также можно определить. Однако во всех этих случаях крайне важно исключить загрязнение «современным» углеродом *). Например, добавление 19% «современного» углерода увеличивает удельную радиоактивность образца, возраст которого составляет 23 000 лет, на 16%, что соответствует уменьшению измеренного возраста на 1300 лет.

Н е к о т о р ы е п р и м е н е н и я

Летописный период истории начался всего лишь 5000 лет назад. Его возникновение следует приписать Египту, где был введен первый календарь, который основывался на наводнениях Нила и на изменении положения одной из ярких звезд — Сириуса (Софиса). В остальных странах древнего мира календари были изобретены гораздо позже. Однако торговля и войны между различными странами приводили к тому, что свойственные данной стране гончарные изделия, орнаменты, оружие и т. д. проникали в другую страну; благодаря этому можно установить

*) «Современным» автор называет углерод, отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в котором соответствует содержанию радиоактивного углерода живой материи, т. е. тот углерод, в котором отношение числа атомов ^{14}C к числу атомов ^{12}C равно $1/0,8 \cdot 10^{12}$.

совпадение во времени стратиграфических уровней в совершенно различных местах и тем самым связать между собой хронологические периоды соответствующих стран. Полученные таким образом хронологические таблицы окончательно устанавливаются в процессе сравнения с хронологическими таблицами таких стран, как Египет, где в то время уже существовал календарь. Замечательным примером является рисунок, высеченный на одном из камней святилища Стоухендж *); он аналогичен рисункам, высеченным на микенских гробницах в Южной Греции **), которые связываются с легендарным изображением Агамемнона и датируются 1600—1500 гг. до н. э.

Важной задачей метода определения возраста по содержанию радиоактивного углерода является проверка правильности таких предположений об исторической взаимосвязи. Действительно, установленный этим методом возраст оленьего рога, найденного недавно около одного из камней святилища Стоухендж: 1730 (± 150) г. до н. э.

Возраст, определенный с помощью указанного метода, не всегда, однако, согласуется с археологическими исследованиями. Так, год или два назад общепринято археологическое время начала эпохи неолита, в которой оседлое хозяйство заменило охоту как средство добывания пищи — приблизительно 2000 г. до н. э. Неоднократные измерения этого возраста по содержанию радиоактивного углерода в древесном угле, образование которого относится к этому периоду, давали примерно 3000 г. до н. э., что, по существу, противоречило археологическим доказательствам. Однако это и не удивительно, так как начало неолитической эпохи предшествует дате введения египетского календаря.

Таким образом, метод измерения возраста по содержанию радиоактивного углерода для преесторической археологии совершенно необходим. Измерения возраста двух образцов древесного угля, найденных близ Иерихона в слое, относящемся к мезолитической (преднеолитической) эпохе, показали, что образование этих образцов следует отнести соответственно к 7900 (± 240) и 7870 (± 240) гг. до н. э. Тем самым преднеолитический период длился чрезвычайно мало, что указывает на удивительно быстрое продвижение человека к оседлой цивилизации после улучшения климата, вызванного окончанием ледникового периода.

Рассматриваемым методом довольно подробно изучалась также хронология последней стадии ледникового периода в Северо-Восточной Европе и Северной Америке ³. Для этого анализировались зернышки пыльцы, принадлежащей деревьям, кустарникам и растениям того периода. Изобилие некоторых видов растительности указывало при этом на изменение климатических условий в сторону их улучшения. Начало ледникового периода во всей Северо-Восточной Европе следует отнести, по-видимому, примерно к 10 000 г. до н. э.; последовавшее после этого

*) Стоухендж — один из крупнейших памятников энеолитической эпохи (переходного периода между неолитом и бронзовым веком). Расположен в Англии у подножия горы Солсбери. Состоит из врытых в землю столбообразных каменных блоков высотой до 8,5 м и весом до 40 т, на которых покоятся каменные плиты весом до 6,5 т; окружен валом и рвом, ограничивающими круг диаметром 114 м. Назначение его, по-видимому, культовое, связанное с культом Солнца, по одной из теорий, и культом предков, по другой.

**) Микены — древнегреческий город на Пелопоннесе, разрушенный в 463 г. до н. э., в период греко-персидских войн. В микенских погребениях, раскопки которых были начаты немецким археологом Генрихом Шлиманом в 70-х годах прошлого столетия, было найдено много интересных археологических предметов (изделия из золота, серебра, слоновой кости и т. д.), многие из которых свидетельствовали о торговле Микен с Египтом, Ливией, Критом и другими странами.

изменение климатических условий, о котором говорилось выше, было временным, так как на период с 8800 до 8300 г. до н. э. снова установился холодный климат.

Указанное наводит на мысль, что начало и конец этого последнего холодного периода настолько быстро сменили друг друга, что значительные климатические изменения имели место даже на протяжении отдельной человеческой жизни.

Окончательное отступление ледника в Центральной Швеции произошло около 8100 г. до н. э. Эта дата была установлена методом подсчета количества слоев глины, предложенным Де-Гиром (см. ниже); ее согласование с соответствующей датой, полученной методом измерения радиоактивности, кажется весьма удовлетворительным для обоих методов. В остальных странах, в частности в Северной Америке, метод измерения радиоактивности относит начало внезапного и резкого снижения средней температуры к 9000 г. до н. э.; эти измерения включали в себя анализ осадков, взятых в соответствующей части Атлантического океана, а также определение отношения изотопов $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, знание которого позволило установить температуру в дополнение к данным ботанического характера.

Метод определения возраста по содержанию радиоактивного углерода имеет также техническое применение. Например, при разведке нефти иногда довольно трудно установить, возникает ли нефть, найденная вблизи поверхности земли, из небольшого, недавно сформировавшегося кармана или же она вытекает из мощного, глубоколежащего, издавна существующего месторождения. Ответ можно получить применением указанного метода.

Максимальный возраст, который можно установить измерением содержания радиоактивного углерода, составляет около 70 000 лет. Это требует, однако, проведения перед измерениями искусственного обогащения радиоактивного углерода ^{14}C обычным углеродом ^{12}C с помощью тепловой диффузионной колонки.

Без предварительного искусственного обогащения максимальный возраст, который можно измерить вышеупомянутым методом, составляет примерно 50 000 лет.

Источники систематических ошибок

Метод определения возраста по содержанию радиоактивного углерода ^{14}C основан на предположении, что отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ для живой органической материи во все времена было одинаковым. Следовательно, поскольку период полураспада ^{14}C уже найден на основании точных лабораторных измерений вероятности распада радиоактивного углерода, указанный метод определения возраста дает абсолютную хронологическую таблицу, т. е. таблицу, не требующую какой-либо дополнительной калибровки по образцам, возраст которых известен. Однако имеется ряд обстоятельств, указывающих на то, что вышеупомянутое предположение может оказаться слишком сильным; следовательно, определение содержания радиоактивного углерода в образцах, возраст которых известен, крайне желательно для установления точности исходного предположения. Оказалось, что согласование египетской хронологии с датами, полученными методом подсчета числа слоев, достаточно хорошо для того, чтобы считать исходное предположение разумным приближением, дающим точность, равную 5%.

Наиболее очевидной причиной варьирования отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ являются вариации интенсивности космических лучей. Даже если отвлечься

от каких-либо космических влияний (которые вряд ли играли заметную роль на протяжении последних пятидесяти тысяч лет), не исключены изменения величины магнитного поля Земли. Приближающиеся к Земле заряженные частицы отклонялись ее магнитным полем, поэтому для каждой данной географической широты прошедшие космические лучи должны были обладать энергией, не превышающей некоторую определенную величину. Если в прошлом магнитное поле Земли было сильнее, то энергия обрезания была ниже, т. е. вероятность образования радиоактивного углерода ^{14}C уменьшалась. Имеются доказательства, основанные на измерении величины остаточного термомагнетизма кирпичей и глиняной посуды, оставшихся от прошлых цивилизаций (об этом говорится во второй части статьи), что 2000 лет назад магнитное поле Земли было почти вдвое сильнее⁴. Эльзассер, Ней и Винклер установили⁵, что если бы магнитное поле Земли было все время постоянно, а затем, 2000 лет назад, его величина вдруг стала бы экспоненциально уменьшаться вплоть до своего теперешнего значения, метод определения возраста по содержанию радиоактивного углерода дал бы для образца с истинным возрастом в 2000 лет возраст, равный 2240 годам, если бы эффект уменьшения величины магнитного поля Земли при этом не учитывался. Однако, если экспоненциальное уменьшение началось 4000 лет назад, то ошибка в определении возраста сильно увеличится и составит примерно 1000 лет для образца, истинный возраст которого равен 4000 годам.

Точные измерения на образцах, возраст которых известен, в настоящее время распространены на образцы, относящиеся к 1900 г. до н. э.⁶ Результаты этих измерений исключают последнюю возможность, но отнюдь не противоречат первой. Кажется возможным поэтому, что изменение величины магнитного поля было лишь флуктуацией, т. е. значение поля, усредненное по периоду в несколько тысяч лет (такая длительность периода необходима, чтобы заметно изменить отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$), оставалось постоянным.

Тщательные измерения радиоактивности куска древесины, взятой из годовичного кольца, со времени образования которого прошло 1300 лет⁷, показали, что флуктуация отношения $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в живой материи достигает 1—2% (что соответствует при определении возраста ошибке в 80—160 лет).

Возможной причиной резкого изменения интенсивности космических лучей являются вариации солнечной активности. Другой причиной являются вариации степени перемешивания различных частей резервуара, в котором происходит циркуляция углерода. Например, внезапное появление на поверхности глубокого океана слоя воды с относительно малым содержанием радиоактивного углерода может вызвать временное уменьшение содержания радиоактивного углерода в атмосфере. Интересны два недавно наблюдавшихся эффекта. Поскольку весь радиоактивный углерод, находившийся в каменном угле и нефти, к настоящему времени снова превратился в азот, сжигание этого топлива с начала индустриальной революции освободило в атмосферу такое количество обычного углерода ^{12}C (без примеси радиоактивного углерода ^{14}C), что к 1954 г. отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ уменьшилось приблизительно на 2%. Поэтому необходимо построение диаграммы специфической «радиоуглеродной» активности живой материи, что можно выполнить на основе измерений на деревьях известного возраста, произраставших до 1850 г.

Эффект «ископаемого топлива» был достигнут в настоящее время благодаря возникновению радиоактивного углерода при испытаниях водородных бомб. В 1959 г. в атмосфере отношение $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ в двуокиси

углерода возросло на 25%. Что касается тех типов водородных бомб, которые сбрасываются из стратосферы, то в этом случае должно пройти время, пока максимум эффекта достигнет уровня Земли; даже если больше не будет производиться взрывов водородных бомб, ожидается дальнейшее увеличение этого отношения, максимум которого будет достигнут около 1963 г.

Если не принимать во внимание необходимости дополнительных предосторожностей при проведении соответствующих измерений, радиоактивный углерод, образовавшийся при испытаниях водородных бомб, не оказывает какого-либо влияния на точность определения возраста археологических образцов. Однако попытка определить возраст образца, который в настоящее время усваивает радиоактивный углерод из атмосферы, заранее обречена на неудачу.

3. ТЕРМОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА

Материалы, возраст которых можно определить по содержанию радиоактивного углерода, не всегда удается найти при археологических раскопках; вместе с тем сохранность таких материалов, за исключением древесного угля, сильно зависит от климата. Осколки глиняной посуды, наоборот, обычно обнаруживают при раскопках в большом количестве. Дело в том, что они практически не поддаются разрушению. В связи с этим важную роль играет техника термолюминесцентного определения возраста предметов гончарного производства, в настоящее время разрабатываемая проф. Дж. Кеннеди из Калифорнийского университета. Оказывается, что в глине присутствует небольшое количество примесей урана и тория. Это количество не является постоянным, но обычно составляет всего несколько миллионных долей. Альфа-частицы, излучаемые ураном и торием, наносят радиационные повреждения глине, что приводит к появлению дефектов в решетке, характерной для кристаллической структуры соответствующих минералов.

В такой поврежденной решетке электроны попадают в ловушки, и, если впоследствии глину обжечь, т. е. нагреть до температуры в несколько сотен градусов, электронные ловушки освобождаются; это сопровождается излучением небольшого количества видимого света. Интенсивность света пропорциональна числу дефектов решетки. Ее можно измерить с помощью специально подобранного фотоумножителя с низким уровнем шумов, а также усилителя постоянного тока.

Процесс обжига, являющийся неотъемлемой частью гончарного производства, освобождает все ранее сформировавшиеся электронные ловушки. Поэтому интенсивность термолюминесценции пропорциональна времени, прошедшему со дня обжига, т. е. пропорциональна возрасту осколка глиняной посуды.

На практике предметы гончарного производства перед измерениями необходимо освещать рентгеновскими лучами. Дело в том, что попавшие в «ловушку» электроны в течение столетий покидают ее благодаря квантовомеханическому туннельному эффекту; поэтому необходимо повторное наполнение ее.

Для определения истинного возраста необходимы вспомогательные измерения двух видов. Нужно найти, во-первых, специфическую α -активность осколка и, во-вторых, количество повреждений, наносимых радиационными излучениями кристаллической решетке в единицу времени. Последнее можно установить, в частности, поместив исследуемый образец на пути пучка протонов с энергией 40 Мэв. При этом, однако, остается

неизвестной относительная эффективность протонов и α -частиц для образования повреждений кристаллической решетки. Это устанавливается путем проведения измерений на надежно датированных предметах гончарного производства; при этом делается предположение, что относительная эффективность для всех сортов глины одинакова.

4. МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА ПУТЕМ ПОДСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА СЛОЕВ

Метод определения возраста по содержанию радиоактивного углерода и термолюминесцентный метод аналогичны методу измерения высоты лестницы с помощью барометра. Другой метод измерения высоты состоит в подсчете числа ступенек и умножении этого числа на высоту отдельной ступеньки. С ним можно сравнить метод определения возраста путем подсчета количества годовичных колец у дерева (дендрохронология), метод подсчета количества различных слоев глины и недавно развитый метод подсчета слоев стекла.

Подсчет годовичных колец в сечении дерева является очевидным способом определения возраста. Первое археологическое применение этого способа относится к 1811 г. Де-Витт Клинтон, исследовавший земляные укрепления вблизи Канадайна в штате Нью-Йорк, подсчитал количество годовичных колец в растущих на них деревьях и определил, что их возраст составляет тысячу лет и, следовательно, они не могли быть построены европейцами или современными индейцами.

Дождливому лету соответствуют толстые годовичные кольца, а сухому лету — тонкие. Следовательно, данному чередованию количеств ежегодных осадков отвечает определенная последовательность в толщине годовичных колец. Это делает возможным определение возраста путем использования нескольких поколений деревьев. Необходимо, начиная с недавно срубленного дерева, подобрать группу ранних годовичных колец, соответствующую некоторому набору годовичных колец в более старом дереве, и т. д.

Ежегодные наслоения, подобные годовичным кольцам деревьев, найдены в глине, источником которой были бассейны озер, запруженных ледниками. Летом таяние происходит быстрее, чем зимой; следовательно, образовавшийся слой осадка — более сырой и более толстый. Последовательность слоев отождествляется тем же самым способом, как и в случае годовичных колец на деревьях; используя метод подбора одинакового чередования слоев при движении назад, Де-Гир оказался в состоянии установить точную дату конца последнего ледникового периода — 8100 г. до н. э. О согласовании этой даты и даты, полученной методом определения возраста по содержанию радиоактивного углерода, уже говорилось.

Переливающиеся всеми цветами радужные отблески на старом стекле некоторое время назад также стали объектом изучения. Подобное исследование впервые было проведено в 1963 г. Бревстором. Оказалось, что радуга возникает в результате интерференции в образовавшихся на поверхности стекла наслоениях, имеющих толщину от 0,0003 до 0,015 мм. Недавнее исследование таких наслоений в образце, история которого известна (это исследование проведено Бриллом и Худом⁸ в 1961 г. в Корнингском музее стекла, штат Нью-Йорк), показало, что они состоят из ежегодно появляющихся пленочек, так же как при образовании ежегодных наслоений в глине. Техника соответствующего метода подсчета основана на отборочном выщелачивании щелочных окисей, в результате чего остается гидратный остаток с высоким содержанием

двуокиси кремния. Изменения температуры или состава воды, которые имеют место каждый сезон, приводят к необратимым изменениям в содержании двуокиси кремния. Стекло с высоким содержанием воды или поташа в какой-то степени также подвергается изменениям такого типа, причем влажность способствует подобному процессу.

5. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА

Г е о л о г и ч е с к и й м е т о д

Свинец-206 образуется из урана-238 в результате целого ряда следующих друг за другом радиоактивных превращений. Эффективное время полураспада урана-238 при этом составляет 4500 млн. лет. Таким образом, измеряя в горной породе отношение количеств свинца и урана-238, мы можем найти время ее образования: горная порода тем старше, чем больше содержание в ней свинца. На этих рассуждениях основано несколько методов, применяемых в геологии. Среди интересных нас радиоактивных изотопов, естественно, имеются элементы, присутствовавшие в земной коре во время ее образования, и если их время жизни сравнимо с археологическим возрастом, они уже давно должны были бы распасться. Тем не менее один из геологических методов, несомненно, может представлять интерес для археологии; этот метод основан на распаде калия-40 в аргон-40. Соответствующее время полураспада составляет 1330 млн. лет, однако с помощью достаточно чувствительной измерительной техники можно найти количество аргона, образовавшегося в вулканической лаве, возраст которой равен всего нескольким сотням тысяч лет. Этот метод позволяет сильно сдвинуть границу абсолютно определяемого возраста, которая в случае определения возраста по содержанию радиоактивного углерода составляет всего 50 000 лет. Таким образом, можно охватить период, особенно важный для антропологии. Недавно указанный метод был использован в Калифорнийском университете для определения возраста ископаемых остатков синантропа, найденного доктором Лики в 1959 г. в Олдувейском ущелье. Этого синантропа за его огромные зубы и массивные челюсти называли «щелкунчиком». Найденный возраст оказался равным 1 750 000 лет — на миллион лет больше, чем давали предыдущие оценки. Следует отметить, что этот исправленный возраст согласуется со все возрастающей уверенностью в том, что плейстоценовый период начался фактически значительно раньше, чем это считалось до сих пор. Результаты, полученные в настоящее время для базальта, расположенного под слоем, соответствующим плейстоценовому периоду, указывают на возраст, равный всего лишь 1 300 000 лет.

О п р е д е л е н и е в о з р а с т а к о с т е й

В костях благодаря процессу разложения содержащего фосфор минерала (гидроксиапатита), из которого в основном состоит костное вещество, постепенно накапливаются фтор и уран. К несчастью, скорость процесса их накопления зависит от количества этих элементов в грунтовых водах, которые всегда имеются в почве; поэтому одинаковое процентное содержание фтора или урана в костях, находившихся в различных условиях, еще не означает, что эти кости относятся к одному и тому же периоду. Однако возможно определить возраст костей по отношению друг к другу, если они найдены в той же самой породе. В частности, с помощью такой техники было доказано, что версия о Пилтдаунском человеке

является фальсификацией *). Действительно, в то время как в суонскоумском черепе **) содержалось 1,7% фтора и 0,0027% урана, полтдаунский череп содержал соответственно только 0,1 и 0,0002% этих элементов, что следует сравнить с процентным содержанием фтора и урана в костях, относящихся к настоящему времени: эти кости содержат 0,03% фтора и вообще не содержат урана. Измерение процентного содержания азота также полезно, так как количество азота в костях уменьшается по мере исчезновения в них коллагена. В указанных выше случаях содержание азота оказалось равным нулю, 3,9 и 4,0% соответственно.

Новым методом, позволяющим отличать ископаемые кости от фальсифицированных современных костей, является измерение скорости звука. Оказывается, что скорость распространения звука в костях уменьшается по мере их старения. Например, скорость звука в костях, возраст которых составляет 500 лет, вдвое меньше, чем в костях, относящихся к настоящему времени; поэтому последние легко отличить от первых. Если же скорость звука в кости составляет одну четверть скорости звука в кости, относящейся к современному периоду, то возраст этой кости равен примерно 5000 лет. Точное значение возраста такой техникой установить не удается.

6. АНАЛИТИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Определение возраста для археолога-дилетанта — сплошное удовольствие, причем, чем старше предмет, тем больше благоговения перед ним он испытывает. Что касается настоящего археолога, то для него даты образуют каркас здания, которое он затем достраивает, используя характерные черты обнаруженных им цивилизаций. Хотя без каркаса соорудить здание невозможно, не он является конечной целью строительства. Конечной целью археологии является определение путей, по которым шло развитие первых цивилизаций, а также понимание того, каким образом росли, развивались и приходили в упадок цивилизации и культуры, последовательно сменявшие друг друга.

Культуры классифицируются прежде всего по основным материалам, из которых делались орудия труда и оружие: каменный век, бронзовый век и железный век; вместе с тем учитывается различие употреблявшихся тогда предметов или их стилей; например, индийцы — делатели корзин, народы нового каменного века, производившие кубки, и т. д. При исчерпывающей классификации дальнейшее подразделение в понятиях визуальных характеристик возможно, например, благодаря определению химического состава предметов; археолог в этом случае должен постоянно иметь научные контакты с химиками-аналитиками. Дело в том, что за последнее десятилетие методика химического анализа — в особенности это касается обнаружения следов примесей — очень сильно продвинулась вперед из-за использования методов физики. Некоторые из этих методов безвредны или почти безвредны для образца и, таким образом, особенно

*) В 1911—1915 гг. в Англии, близ селения Пилтдаун, были найдены человеческий череп, близкий по строению к черепу современного человека, и нижняя челюсть, похожая на нижнюю челюсть шимпанзе. Череп и челюсть долгое время приписывались одному лицу — зоантропу, предполагаемому предку как неандертальского, так и современного человека. Химический анализ костей, произведенный в 1953 г., показал, что челюсть принадлежала современному шимпанзе и выглядела древней лишь благодаря обработке ее перекисью марганца. Череп оказался принадлежащим человеку палеолитической эпохи (древнего каменного века), которая считается эпохой появления первых обезьянолюдей (питекантропов и синантропов).

**) Суонскоум — местность близ Лондона. В 1935 г. здесь была найдена затылочная и теменная кости человека, относящиеся ко времени первого обледенения четвертичного периода (четвертичный период — настоящий период геологической истории Земли — начался около миллиона лет назад).

важны для археологических исследований. Три метода, которые будут далее рассматриваться: спектроскопия видимого света, спектрометрия рентгеновских лучей и измерение нейтронной активности — включают в качестве составного элемента метод идентификации элементов примеси путем обнаружения электромагнитного излучения с данной характеристической длиной волны. Такое излучение генерируется при соответствующем возбуждении электронами, находящимися на внешних и внутренних электронных оболочках, или ядром для первого, второго и третьего метода соответственно. Методы анализа, о которых пойдет речь, в принципе все применимы к археологическим исследованиям, однако в каждом данном случае существует проблема выбора наиболее пригодного из них.

С п е к т р о с к о п и я в и д и м о г о с в е т а

Для этой хорошо разработанной методики достаточно примерно 10 мг вещества образца, которое вводится в пламя электрической дуги или вспышки. Возбуждение и ионизация внешней электронной оболочки вызывают испускание видимого света строго определенной длины волны: атомы данного элемента излучают свет, соответствующий тем длинам волн, которые характерны для этого элемента, причем измерение интенсивности света дает возможность определить процентное содержание данного элемента. Излучаемый свет с помощью кварцевой призмы расщепляется на лучи, соответствующие определенным длинам волн и оставляющие след на фотопластинке. Степень почернения каждого следа измеряется микрофотометром, после чего концентрация различных элементов в образце может быть найдена сравнением экспонированной фотопластинки с фотопластинками, соответствующими стандартным образцам, т. е. образцам, состав которых известен. Таким способом можно обнаружить элемент, концентрация которого равна всего нескольким миллионным долям.

Подобная техника впервые была применена Янгансом и Зангмейстером⁹ к исследованию большого количества древних медных монет и бронзовых орудий труда. Для этого в музеях всей Западной Европы было отобрано несколько тысяч образцов (их получили высверливанием крошечных ямок на предметах, о которых идет речь). С помощью сложных статистических методов результаты анализа были подразделены на двенадцать групп, каждая из которых соответствовала определенному составу образцов. Необходимость такого подразделения возникает, по-видимому, из-за различной географической локализации предметов. Таким образом, сравнение результатов анализа и археологических данных, относящихся к рассматриваемым предметам, позволяет сделать полезные выводы о распространении культур в ранний период бронзового века.

Однако указанный метод, вообще говоря, неприменим к последнему периоду бронзового века, так как в то время широкое распространение получила практика переплавки металлического лома. Тем не менее анализ 500 предметов, а именно оружия и орудий труда, относящихся к среднему и позднему периодам бронзового века на территории Британии, показал, что металл позднего периода характеризуется преднамеренным добавлением свинца (обычно 4—7%), что делалось либо для уменьшения его стоимости, либо в целях экономии олова или меди. Другое важное применение метода оптической спектрографии относится к обожженной глине, из которой сделаны продукты римского гончарного производства¹⁰. Начало этому положил анализ вещества, соскобленного с одного из чаще-подобных сосудов — мортария, внутренняя поверхность которых усы-

пана гравием и которые предназначены для того, чтобы толочь и измельчать пищу; на дне этих сосудов мастера обычно оставляли печать с указанием своего имени. Оказалось, что состав глины, употреблявшейся одним и тем же гончаром, был приблизительно постоянным и что, кроме того, имеется корреляция между составами глин, использованных мастерами, жившими в одном географическом районе; этого и следовало ожидать, так как ввозить глину было бы неэкономично.

При анализе покрытых краской изделий был установлен характерный состав различных продуктов гончарного производства, центры которых находились в Британии (а именно для Колчестера: Na_2O — 0,4%, MgO — 1,6%, MnO — 0,30%, TiO_2 — 1,3%, CaO — 2,2%, FeO — 7,3%, K_2O — 3,7%, в то время как для Грейт-Кастерона (в Линкольншире): Na_2O — 1,16%, MgO — 0,42%, MnO — 0,01%, TiO_2 — 2,4%, CaO — 0,75%, FeO — 3,5%, K_2O — 2,1%). Несмотря на ожидание сильных отклонений от средних значений, различие в процентном содержании некоторых окисей (в частности, CaO в указанных примерах) достаточно велико и позволяет с большой степенью достоверности приписать данный осколок глиняной посуды к одному из нескольких возможных центров гончарного производства.

При дальнейшем расширении подобных исследований можно было бы построить общую схему организации торговли предметами гончарного производства в Британии времен римского владычества. Например, анализ глиняных изделий, найденных в форте на вале Адриана *), мог бы указать, какие центры гончарного производства снабжали своей продукцией части римской армии. Дальнейшие направления исследований основаны на надежде отыскать дополнительные доказательства в споре Пальмера и Эванса относительно падения Кносса **). Если станет возможно путем анализа отличать глиняные изделия, сделанные в Кноссе, от глиняных изделий, сделанных на материковой территории Греции, то изучение войны, возникшей в Средиземноморье, дало бы ответ на вопрос, являлся ли Кносс в период между 1400 и 1200 гг. до н. э. активным экспортирующим центром, как это утверждает профессор Пальмер, или же его цивилизация приходила в упадок, как заключил сэр Артур Эванс в результате прямого археологического исследования.

Рентгеноскопический анализ

Рентгеновские лучи испускаются при возбуждении внутренних электронных оболочек (что достигается, например, облучением образца непрерывным спектром рентгеновских лучей, посылаемых 50-кв рентгеновской трубкой); их пучок имеет длины волн в интервале от 0,2 до 20 Å ($1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ см}$) и расщепляется на составляющие его длины волн с помощью дифракционного кристалла. В частности, в кварце расстояние между плоскостями кристаллической решетки равно 3,34 Å, поэтому отражение рентгеновских лучей от поверхности кристалла происходит только в случае, когда угол падения выбран так, что максимальная длина, проходящая рентгеновскими лучами, отраженными от последовательных

*) Вал Адриана — название остатков римских укреплений в Британии, построенных для защиты северной границы захваченной римлянами части Британии по приказу римского императора Адриана (117—138 гг.). Стена вала имеет 4 фута высоты и 5 футов ширины, длина вала составляет примерно 118 км.

**) Кносс — в древности город на острове Крит. В XVI в. до н. э. — центр Критской державы, в подчинении которой находились острова Эгейского моря и часть материковой Греции.

плоскостей кристаллической решетки, составляет целое число длин волн. Отраженные лучи можно обнаружить либо с помощью фотопластинки, либо более обычными способами — счетчиком Гейгера, пропорциональным газовым счетчиком или сцинтилляционным счетчиком. Кристалл и детектор ориентированы (с помощью соответствующим образом устроенного механического приспособления) таким образом, что коллиматор и детектор всегда составляют по отношению к поверхности кристалла один и тот же угол θ . Концентрация данного элемента определяется измерением интенсивности пучка, попадающего в детектор, когда значение угла θ соответствует длине рентгеновских лучей, генерируемых данным элементом. Как и в случае оптического спектрометра, необходима калибровка прибора по стандартам приблизительно того же состава, что и образец (рис. 2).

Так как рентгеновские лучи сильно поглощаются веществом, результаты анализа относятся только к тонкому слою, лежащему на поверхности

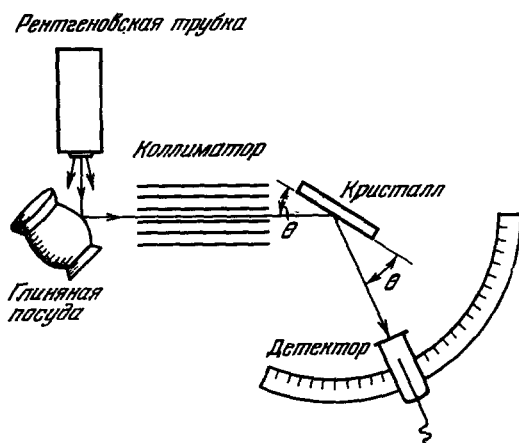


Рис. 2. Схема рентгеновского флуоресцентного спектрометра.

образца, что позволяет изучать ценный фарфор, и быстроту измерения, на которое тратится при этой методике вдвое меньше времени. Белый и голубой китайский фарфор производился гончарными мастерами в течение нескольких веков в период доминской, минской и цинской династий *).

Вариацию качества красок на фарфоре, относящемся к одному времени, следует приписать употреблению ввозимой кобальтовой руды для наиболее ценных сортов фарфора и употреблению местной кобальтовой руды для относительно малоценных сортов. Дело в том, что кобальтовая руда из всех без исключения месторождений, расположенных на территории Китая, содержит высокий процент марганца, в то время как руда из персидских месторождений (по-видимому, Персия в то время являлась наиболее крупным поставщиком кобальтовой руды) и месторождений Среднего Востока марганца не содержит. Гипотеза, утверждавшая, что высокое качество фарфора определяется количеством импортного пигмента, была проверена измерением содержания марганца по отношению

*) Время правления минской династии — 1368—1644 гг. В 1644 г. в Пекине установилась власть манчжурской династии Цин, которая правила страной вплоть до революционных событий 1911—1912 гг. Под доминской подразумеваются, по-видимому, сунская и юанская династии (960—1368 гг.).

рассматриваемого образца; толщина этого слоя примерно составляет от 0,01 до 0,1 мм. Следовательно, этот метод очень удобен для анализа глазури на глиняной посуде. Классическим примером таких исследований является работа доктора Стюарта Юнга, изучавшего белый и голубой китайский фарфор с помощью автоматизированного рентгеновского спектрометра, усовершенствованного Э. Холлом в Оксфордской археологической лаборатории. Подобное применение иллюстрирует два основных преимущества рентгеноскопического анализа — его абсолютную безвредность для

к кобальту на части поверхности образцов, покрытой голубой краской. Так как никакой взаимосвязи между высоким содержанием марганца и высоким качеством окраски обнаружено не было, эта гипотеза отвергнута. Однако оказалось, что в некоторые периоды ввозимая руда вообще не употреблялась — ее использование прекратилось в XVI в. Что касается собственной руды, то она не имела применения до начала XV в.

Результаты, представленные на рис. 3, в частности, указывают, что таким путем можно проверить подлинность белого и голубого фарфора, относящегося к периоду до 1400 г. или к периоду после 1600 г.

Измерение нейтронной активности

Методом анализа, основанным на испускании рентгеновских лучей, можно исследовать только тонкий слой поверхности образца; хотя подобная техника весьма пригодна для изучения глазури, она может привести к неправильным результатам, если, например, ее применить для исследования монет. Дело в том, что коррозия, т. е. появление на поверхности монеты примесей, и намеренное покрытие поверхности монеты металлом приводят к тому, что состав поверхностного слоя имеет мало общего с составом монеты в целом. В этом случае на помощь приходит метод измерения нейтронной активности, который идеально подходит для анализа монет, так как нейтроны, употребляемые в качестве возбуждающего агента, так же как и испускаемые в результате такого возбуждения характеристические γ -лучи, очень слабо поглощаются веществом. Главным недостатком этого метода является необходимость использовать ядерный реактор для получения интенсивного нейтронного пучка (интенсивность такого пучка должна быть порядка 10^{12} нейтр/см²сек, что необходимо для получения требуемой чувствительности метода). Вера Имеллус, широко применявшая эту технику, сделала значительный вклад в историю экономики археологических уровней Греции, а также в область нумизматики, изучающую историю чеканки серебряных монет в Древней Греции. Она проанализировала около 600 монет, что, разумеется, возможно лишь с помощью безвредного для монет метода. Для этого сосуд, содержащий около дюжины монет, приходилось помещать в один из действующих каналов реактора БЕПО в Харуэлле. Изъятые из реактора монеты (которые находились в реакторе от 5 минут до 5 недель, в зависимости от величины периода полураспада исследуемых примесей) были уже слабо радиоактивными; их излучение измерялось гамма-спектрометром. Использовались также обычный сцинтилляционный кристалл йодистого натрия и фотоумножитель.

Двумя главными примесями в греческих серебряных монетах были золото и медь. Для их обнаружения использовались следующие ядерные

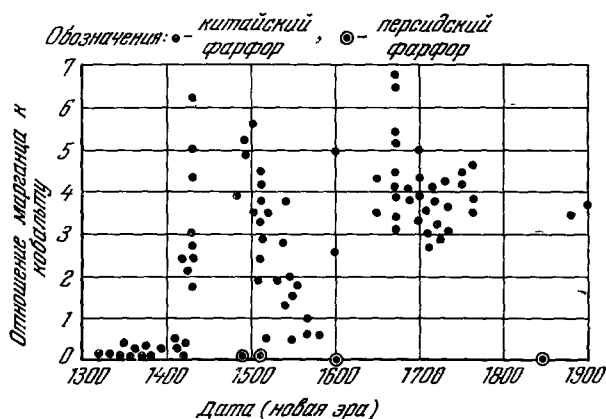
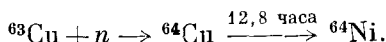
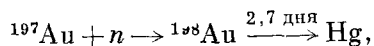


Рис. 3. Анализ белого и голубого китайского фарфора.

Кобальтовая руда из китайских месторождений богата марганцем, т. е. низкое отношение марганца к кобальту указывает на использование импортного пигмента.

реакции:



Образование стабильных изотопов ^{198}Hg и ^{64}Ni сопровождается излучением γ -лучей с энергиями 0,41 и 0,511 Мэв соответственно. Таким образом, обнаружение γ -лучей с такими энергиями указывает на присутствие

в монете золота и меди, причем интенсивность излучаемых γ -лучей пропорциональна концентрации соответствующего элемента. Интерпретация результатов такова: концентрация золота определяется рудой, из которой было выплавлено серебро; наличие меди является доказательством искусства мастеров, хитростью, а именно примешиванием меди, уменьшившим количество затраченного на одну монету ценного металла. Действительно, несмотря на неумение древних греков отделять примесь золота от серебра, большую часть примеси меди они могли бы удалить, используя процесс купелирования (нагревания в сильном потоке воздуха), который уже употреблялся в то время для устранения примесей свинца. Доказательством последнего утверждения является тот факт, что афинское серебро добывалось из свинцовой руды, месторождение которой у Лавриума в наши дни разрабатывается для получения свинца, причем здесь до сих пор можно обнаружить древнюю аппаратуру, с помощью которой производилось купелирование.

Когда приступили к запланированному анализу, главные результаты, которые надеялись получить, касались источников руды, из которой греческие города добывали свое серебро: например, получал ли Коринф, не имевший своих собственных источников серебра, в V в. до н. э. этот металл из Афин или же эти города в той или иной степени враждовали?

Результаты анализов приведены на рис. 4. Они указывают, что

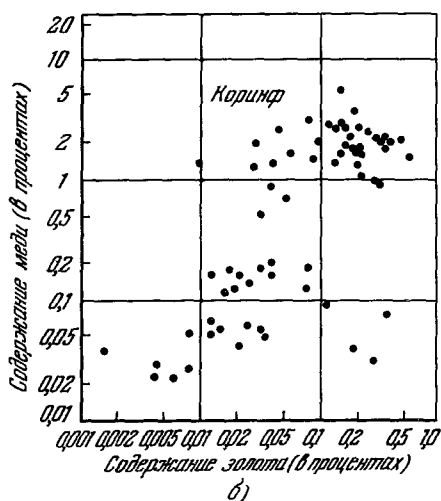
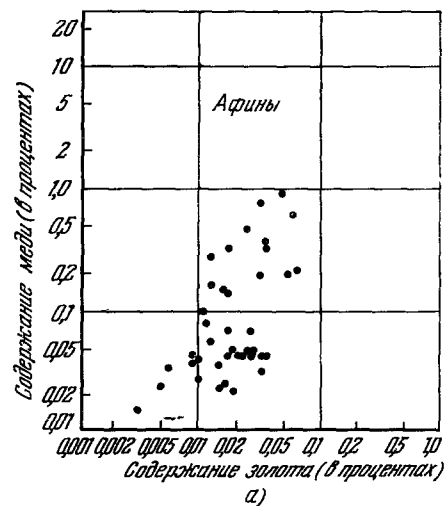


Рис. 4. Анализ нейтронной активности: процентное содержание золота и меди в Афинах (а) и Коринфе (б) в V в. до н. э.

Коринф действительно получал некоторое количество серебра из Афин, хотя это было отнюдь не все поставляемое ему серебро. Здесь следует упомянуть также, что из всех изученных серебряных монет чрезвычайно мало золота, меньше 0,1%, содержали только афинские и македонские монеты; последнее указывает на маловероятный с точки зрения исторических фактов источник коринфского серебра.

В добавление к ожидавшейся информации, касавшейся источников руды, были обнаружены некоторые поразительные и неожиданные факты, проливающие свет на обращение монет. Действительно, хотя ни один из городов не мог соперничать с Лавриумом в тончайшем искусстве мастеров-плавильщиков, умевших уменьшать количество меди в монетах до одного процента и ниже, анализ показал, что техника, используемая в этих городах, давала возможность достичь примеси меди в 1—2%. Например, 50 серебряных тетрадрахм, отчеканенных в Сиракузах в V в. до н. э., а именно в первой четверти этого века, содержали немногим больше 1% меди. Эта цифра на протяжении второй четверти V в. до н. э. постепенно увеличилась до 5%, однако к середине века снова стало характерным преобладание монет с содержанием меди меньше 1%. В третьей четверти содержание меди снова начинает увеличиваться, так что во второй половине века оно колеблется между одним и двумя процентами. Такая ситуация, по-видимому, указывает на преднамеренное изменение содержания меди либо в целях повышения прочности монет, либо в целях экономии серебра. Понижение содержания серебра в монетах во второй четверти V в. до н. э. отражает финансовые трудности, испытываемые сиракузскими тиранами и продолжавшиеся до их изгнания в 461 г. Имеются столь же явные доказательства преднамеренного уменьшения содержания серебра и в Македонии. В течение всего V в. до н. э., на протяжении господства трех царей, выпускались монеты особого достоинства, так называемые тетраболы. Выпускалось два вида этих монет: на одних монетах на лицевой стороне была вычеканена лошадь, несущая всадника, на других — всадника не было. Содержание меди в монетах «со всадником» варьировалось от 0,02 до 0,2%, что является свидетельством искусства македонских мастеров-плавильщиков, живших в V в. до н. э. Монеты «без всадника», наоборот, на 5—20% состояли из меди. Ясно, что македонские цари задолго до экономистов XIX в. понимали выгоду, которую можно извлечь из монеты с обозначенным достоинством.

Р а с с е я н и е β -л у ч е й н а з а д

Когда на поверхность вещества попадают β -лучи, некоторые из них поглощаются, в то время как другие излучаются обратно. Доля рассеянного назад излучения в сильной степени зависит от атомного номера элементов, содержащихся в веществе, так как рассеяние связано с отклонением электронов зарядом ядра. Аппаратура, необходимая для измерения коэффициента рассеяния назад, сравнительно проста (рис. 5) и стоит недорого (ее цена — около 30 долларов). Она состоит из подходящего радиоактивного препарата активностью в несколько микроюри, например таллия-204 (время полураспада — несколько лет, энергия β -лучей 0,76 Мэв), являющегося источником β -лучей, и счетчика Гейгера, служащего для измерения интенсивности рассеянного назад излучения. Необходимое для счетчика напряжение обеспечивается источником питания на полупроводниках; для подсчета числа щелчков в минуту служит полупроводниковый измеритель скорости счета, смонтированный вместе с источником питания (рис. 6). Наиболее полезным применением метода является определение содержания свинца ($Z = 82$) в стекле или глазури. Приборы чувствительны к пятипроцентной и более высокой примеси свинца, их можно прокалибровать с помощью эталонов. Интересующий нас вопрос обычно следующий: добавлен ли свинец намеренно (в этом случае содержание свинца $> 10\%$) или же стекло не должно содержать свинца (т. е. свинец либо вообще отсутствует, либо присутствует лишь в очень малой концентрации)? Следовательно, низкая чувствительность

в данном случае не является помехой и в более чем достаточной степени компенсируется портативностью приборов; в самом деле, последняя дает возможность установить содержание свинца в стекле или глазури, не снимая соответствующий образец с музейной полки. Отметим,

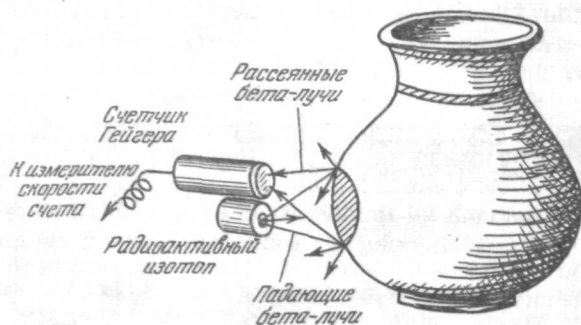


Рис. 5. Анализ рассеянного назад β -излучения.

что такая аппаратура, разумеется, не в состоянии отличать свинец от элементов с более высокими атомными номерами. Из них наиболее часто встречающимся в глазури является олово ($Z = 50$); для его обнаружения обычно применяются другие методы.

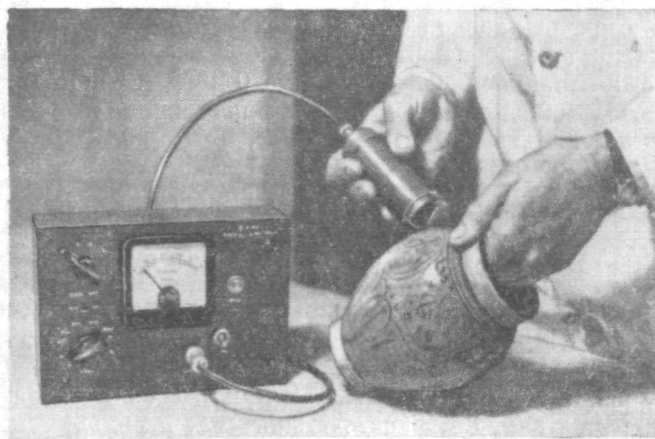


Рис. 6. Измеритель рассеянного назад β -излучения.

Кроме определения содержания свинца, указанная техника применялась в Японии для определения толщины позолоты на статуе Будды. При этом было использовано то обстоятельство, что основной материал, из которого сделана статуя, имеет низкий атомный номер, так что интенсивность рассеяния зависела от толщины позолоты (для золота $Z = 79$); калибровка проводилась на эталоне со слоем позолоты определенной толщины.

II

Учение о магнетизме является старейшей отраслью науки, и очень давно, по крайней мере тысячу лет назад, для навигации *) уже употреб-

*) Закон, действовавший в X в. до н. э. на Готланде, одном из островов Балтийского моря, предписывал наказывать тех моряков, которые осмеливались осквернять компас своим дыханием после того, как ели лук. (Прим. автора.)

лялся компас. Понятно поэтому, что магнитная методика должна играть важную роль среди археологических методов исследования. В связи с этим вторая часть статьи посвящается главным образом магнитному методу определения возраста и местонахождения предметов.

Направление магнитного поля Земли в любом месте меняется каждые двадцать лет на один или два градуса; это и дает возможность определять возраст. В самом деле, когда древние мастера обжигали глиняные предметы, например печи, горны и т. д., они, сами того не зная, фиксировали направление магнитного поля Земли посредством остаточного термомagnetизма, приобретаемого обожженной глиной, содержащей несколько процентов окиси железа. Те же самые особенности этой глины делают возможным определение местоположения закопанных печей и других глиняных предметов с помощью недавно изобретенного протонного магнетометра, используемого для того, чтобы обнаруживать небольшие магнитные неоднородности, возникшие вблизи поверхности земли. Магнитными методами можно находить также археологические ископаемые других типов, особенно те, на которые оказывают влияние химические изменения в почве, связанные с присутствием человека. (Имеются в виду химические изменения, увеличивающие магнитную восприимчивость археологических ископаемых.)

7. МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗРАСТА

Уже более столетия известно, что горная порода в результате нагревания докрасна и последующего охлаждения становится слабо намагниченной, причем направление ее магнитного поля совпадает с направлением силовых линий магнитного поля Земли. Это справедливо и для обожженной глины. В конце XIX в. итальянский ученый Фольгерайтер¹¹ измерил направление остаточного магнитного поля для нескольких древних ваз, которые были захоронены близ Аретто более двух тысяч лет назад. Он установил, что направление этого поля не зависит от ориентации, которую занимала каждая ваза при ее обнаружении, и что угол между этим направлением и основанием вазы примерно один и тот же для всех ваз, если предположить, что, во-первых, приобретенный в процессе обжига остаточный магнетизм в течение нескольких тысячелетий не изменил своего направления и, во-вторых, что основание вазы во время обжига занимало горизонтальное положение. Аналогично направление остаточного магнетизма в кирпичях римской стены никак не связано с ориентацией этих кирпичей.

Следует хотя бы кратко описать механизм появления остаточного термомagnetизма в глине или в горной породе, который практически приводит к тому, что дошедшая до нас обожженная глина непосредственно со времени обжига является как бы документом, в котором зафиксировано направление магнитного поля Земли во время обжига. Это направление характеризуется магнитным склонением D (величиной угла между магнитным северным полюсом и истинным Северным полюсом) и углом наклонения I (углом наклона называется угол между силовыми линиями магнитного поля и горизонталью). Вековые изменения этих углов за период, охватывающий последние несколько сотен лет, известны из прямых наблюдений, выполненных с помощью намагниченных иглолок (рис. 7). Например, в Лондоне между 1600 и 1800 гг. магнитное склонение колебалось от 10° на запад до 24° на восток. Следовательно, дату обжига изделия, относящегося к этому периоду, можно установить с помощью рис. 7 с точностью до ± 12 лет при условии, что направление остаточного магнитного поля определяется с точностью до $\pm 2^\circ$. Это

гораздо более высокая степень точности, чем та, которую можно достичь методом определения возраста по содержанию радиоактивного углерода. Однако, с другой стороны, для магнитного метода необходимой предпосылкой является знание вековых изменений направления магнитного поля Земли. Вековые изменения, относящиеся к периоду до 1600 г., следует определять, измеряя направления остаточного терромагнетизма

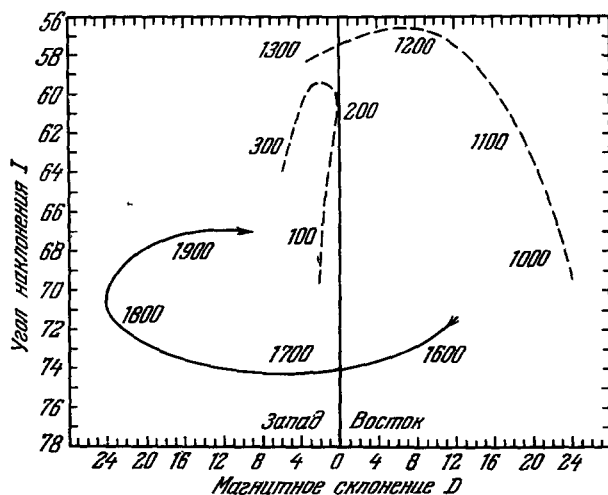


Рис. 7. Кривая вековых изменений (для Лондона). Сплошная кривая (охватывающая период от 1580 г. до наших дней) основана на результатах прямых наблюдений, выполненных с помощью намагниченных иголок. Пунктирная кривая относится к результатам, полученным при измерении направления остаточного магнитного поля в образцах из обожженной глины. Эти образцы были взяты из печей для обжига и сушки предметов гончарного производства, возраст которых установлен археологическим путем.

в глиняных образцах, дата обжига которых известна на основании археологических данных. Такие измерения рассеивают какие-либо надежды на предсказуемость вида кривой вековых изменений; это кажется невероятным также и с других точек зрения. Таким образом, магнитный метод определения возраста полезен прежде всего для увеличения точности датировки предмета, относящегося к периоду, примерные границы которого известны. Отметим, что даже в том случае, когда кривая вековых изменений в данном месте земной поверхности уже найдена, она применима лишь внутри области диаметром около пятисот миль.

Остаточный терромагнетизм

Явление остаточного терромагнетизма было исчерпывающе изучено Теллером в Париже¹²⁻¹⁴, и теоретическую интерпретацию его дал гренобльский профессор Нил¹⁵. Наиболее грубые сорта глины содержат несколько процентов окиси железа. В красной, хорошо окисленной печной глине окись железа содержится в основном в виде красного железняка ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), который является слабым ферромагнетиком. Размеры гранулы красного железняка достаточно малы (от 10^{-5} до 10^{-6} см), поэтому каждую гранулу следует рассматривать в качестве отдельного магнитного домена; так же как и остальные домены, этот домен ориентируется вдоль направления, определяемого формой (кристаллической анизотропией) гранулы. Интенсивность намагничивания доменов не изменяется при

включении магнитного поля; однако если температура достаточно высока, направление поля домена может измениться на обратное, и число доменов, намагниченных параллельно полю, становится больше числа доменов с антипараллельным намагничением (рис. 8). Изменение направления магнитного поля домена возможно, когда энергия термоактивации гранулы сравнима с потенциальной энергией, направленной на поддержание намагничения гранулы вдоль определенного направления. Вероятность изменения направления намагничения домена на обратное является быстро растущей функцией температуры; существует так называемая блокирующая температура T_b , выше которой такое изменение происходит всего за несколько секунд. При температуре ниже T_b изменение направления вектора намагничения может произойти только по прошествии весьма большого промежутка времени. T_b пропорциональна объему гранулы, поэтому гранулам данного размера в образце соответствуют свои собственные блокирующие температуры. Таким образом, нагревание уже до одной или двух сотен градусов по Цельсию приводит к тому, что направление намагничения некоторых гранул меняется на противоположное, в результате чего после охлаждения появляется слабый остаточный магнетизм. Следует заметить, что последний составляет всего лишь 5 или 10% насыщающего намагничения, которого можно было достигнуть, если довести температуру обжига до точки Кюри (для красного железняка точка Кюри находится при 675°C).

В серой восстановленной глине окись железа содержится в виде магнитного железняка (Fe_3O_4). Хотя гранулы в этом случае слишком велики (от 10^{-4} до 10^{-2} см), чтобы соответствовать одному домену, они обладают тем же свойством остаточного термомagnetизма.

В обоих случаях носителями намагничения, возникающего при охлаждении в определенном температурном интервале, являются гранулы, блокирующие температуры T_b которых лежат внутри упомянутого интервала. Эти носители сохраняют остаточный магнетизм до тех пор, пока температура снова не достигнет T_b . Таким образом, глиняная посуда, которую вслед за первым обжигом обожгли еще раз при более низкой температуре T , имеет две компоненты намагничения. Одна из этих компонент является результатом первого обжига; ей соответствуют гранулы, имеющие температуру $T < T_b$. Другой компоненте, соответствующей второму обжигу, отвечают гранулы с температурой $T > T_b$. Эти компоненты могут отвечать различным направлениям намагничения, в зависимости от ориентации глиняной посуды в обоих процессах обжига. В частности, эти компоненты могут быть равны по величине и противоположны по знаку. В этом случае результирующий остаточный магнитный момент равен нулю. Если избавиться от низкотемпературной компоненты магнитного поля, что можно сделать, нагревая образец до температуры T и затем охлаждая его в отсутствие магнитного поля, то направление

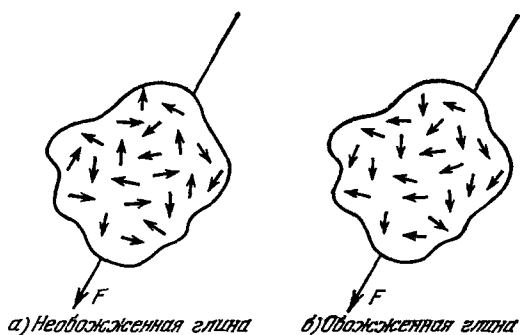


Рис. 8. Появление остаточного термомagnetизма.

Стрелки соответствуют доменам ферромагнитной окиси железа, присутствующей в глине в качестве примеси. Нагревание до нескольких сотен градусов по Цельсию приводит к изменению направления некоторых доменов на противоположное, так что возникает магнитное поле, направление которого совпадает с направлением земного магнетизма F . При охлаждении домены снова «замораживаются», но возникшее магнитное поле остается.

остаточного магнитного поля образца вновь совпадет с направлением магнитного поля во время первого обжига. Таким образом, размагничивая образец путем последовательного уменьшения температур T , иногда удается восстановить всю его историю.

Измерение направления остаточного магнетизма

Чтобы найти, какое направление имело в древности магнитное поле Земли, существенно, конечно, чтобы обожженная глина была найдена как раз в том положении, в котором ее оставили для остывания. Такое условие выполнено у печ для обжига и сушки, в горнах и т. д. Обычно для их строительства или для обжаривания их изнутри применялась

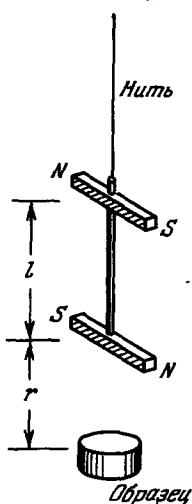


Рис. 9. Астатический магнетометр.

Поскольку магниты имеют одинаковые магнитные моменты, результирующий угловой момент в магнитном поле Земли равен нулю. Намагниченный образец вызывает закручивание нити, так как он расположен ближе к нижнему магниту, чем к верхнему.

благодаря своим огнеупорным свойствам глина. Чтобы определить направление магнитного поля, зафиксированное в печи или горне, вынимают несколько кусков глины из пола или нижней части стены (последнее — для того, чтобы исследовать образцы, которые меньше всего сдвигались во время охлаждения). Прежде чем отделить каждый кусок, следует заметить его ориентацию по отношению к Северному полюсу и горизонтали. Чтобы сделать это, следует с каждого куска снять гипсовый слепок, причем в момент накладывания гипсовой пластинки ее верхняя грань должна быть строго горизонтальна. После этого к указанной грани проводится линия от теодолита, азимутальная шкала которого с помощью солнечной тени ориентирована к Северному полюсу. Направление остаточного магнитного поля каждого образца измеряется в лаборатории с помощью чувствительного магнетометра, после чего вычисляется среднее направление. Дело в том, что направления магнитного поля разных образцов слегка отличаются друг от друга, что связано не только с ошибками измерений и ошибками в определении ориентации образца, но также с искривлением силовых линий во всем исследуемом сооружении и оседанием его с течением времени.

Простейшим инструментом, используемым для измерения направления остаточного магнетизма, является астатический магнетометр. Он состоит из двух одинаково намагниченных брусков, прикрепленных к противоположным концам стержня длиной l (рис. 9) и подвешенных на тонкой нити из фосфористой бронзы или на тонкой кварцевой нити. Так как два магнита антипараллельны, момент вращения верхнего из них в магнитном поле Земли компенсируется угловым моментом нижнего в этом же поле; с другой стороны, угловой момент нижнего магнита в слабом магнитном поле образца, расположенного под этим магнитом на расстоянии r , равном расстоянию между обоими магнитами ($r = l$), в восемь раз больше, чем направленный в противоположную сторону момент вращения образца в поле верхнего магнита.

Тщательно сконструированный и выполненный прибор, работающий на основе указанного принципа, способен обнаруживать магнитное поле образцов, магнитный момент которых равен всего лишь 10^{-7} ед. CGSM. Однако, хотя чувствительность астатического магнетометра более чем достаточна, он имеет тот недостаток, что различие формы образцов или

неоднородность их намагничения сильно влияют на точность определения направления остаточного магнитного поля, если только эти образцы не очень малы. Этого недостатка нет у спиннинг-магнетометра, но зато он устроен гораздо сложнее. Образец вращается со скоростью 300 об/мин внутри большой электрической катушки. Электродвижущая сила, индуцируемая в этой катушке вращающимся магнитным моментом образца,

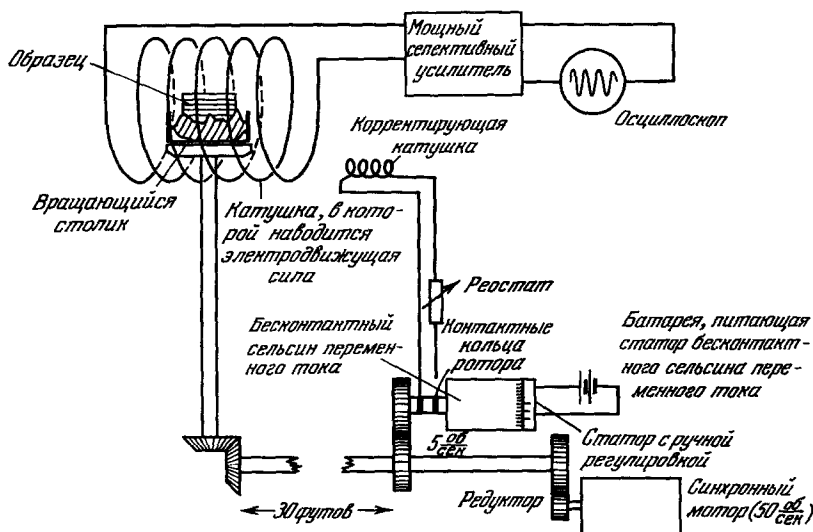


Рис. 10. Спиннинг-магнетометр.

Амплитуда и фаза сигнала, питающего корректирующую катушку, регулируются таким образом, чтобы сигнал, генерируемый вращающимся образцом, точно равнялся нулю. Направление магнитного поля образца определяется по положению статора, при котором сигнал равен нулю.

поступает в цепь мощного селективного усилителя. Направление остаточного магнетизма находят, измеряя фазовый угол индуцируемого переменного напряжения по отношению к вращающемуся валу. На рис. 10 указан один из способов, позволяющих это сделать. Выходное напряжение усилителя компенсируется сигналом противоположного знака, поступающим с корректирующей катушки. Она питается от генератора (бесконтактного сельсина переменного тока), вал которого соединен с валом, вращающим образец. Фаза аннулирующего сигнала подбирается изменением угла статора этого генератора. Таким образом, зная этот угол, мы можем найти направление остаточного магнитного поля.

Результаты

Количество ежегодно обнаруживаемых построек, возраст которых можно установить как археологическими, так и магнитными методами, невелико. Следовательно, чтобы с достаточной точностью найти кривую, отражающую вековые изменения магнитного поля Земли в период от 1000 г. до н. э. до 1600 г. н. э., требуется довольно большое время. Даже если отвлечься от применимости кривой вековых изменений для определения возраста археологических объектов, следует заметить, что знание вековых изменений все же имеет большое значение для геофизики. Любая теория происхождения земного магнетизма должна объяснять наблюдаемые вековые изменения. Поэтому очевидно, что чем больший период охватывают данные о вековых изменениях магнитного поля, тем

лучше для геофизики. В настоящее время установлено, что основная часть магнитного поля Земли генерируется электрическими токами, циркулирующими в жидкой электропроводящей сердцевине Земли. На эту главную часть, сверх того, накладываются магнитные поля, генерируемые токами верхней части атмосферы; однако они редко составляют более нескольких процентов основной части магнитного поля Земли. Кроме того, они ответственны только за краткосрочные флуктуации, которые нас сейчас не интересуют.

Считается¹⁶, что сердцевина Земли представляет собой что-то вроде самовозбуждающейся динамо-машины, источником тока в которой является энергия движения конвекции. Магнитное поле, генерируемое токами, возникающими в такой динамо-машине, аналогично полю, создаваемому прямым магнитом, помещенным в центре Земли; поле такого магнита — это поле диполя. На поверхности Земли имеется, однако, примерно 10 областей, размером с материк каждая, в которых истинное магнитное поле не совпадает по интенсивности и направлению с полем диполя; при этом мы отвлекаемся от значительно более слабых неоднородностей, создаваемых горными породами, содержащими железо. Оказывается, что крупные неоднородности магнитного поля перемещаются на запад со скоростью $0,2 - 0,3^\circ$ долготы в год. В настоящее время принято считать, что такие неоднородности связаны с характером распределения электрических токов вблизи поверхности земного ядра; их дрейф на запад объясняется при этом медленным движением земной коры по отношению к ядру¹⁷. Вековые изменения также являются результатом относительного движения земной коры и ядра; было показано¹⁸, что движение по часовой стрелке, характеризующееся точками на рис. 7, согласуется с предположением о вращении земной коры, если считать, что земная кора несколько тверже, чем ядро. Вероятнее всего, однако, что кривая вековых изменений не замкнута, так как неоднородности распределения токов в земном ядре могут, вообще говоря, меняться на протяжении нескольких столетий; этот период кажется слишком малым, чтобы ядро успело совершить полный круг по отношению к земной коре. Результаты измерений остаточного термомagnetизма, полученные до настоящего времени (см. пунктирную кривую на рис. 7), подтверждают это предположение, если пренебречь тем фактом, что движение против часовой стрелки требует, чтобы ядро иногда двигалось на восток по отношению к земной коре.

Одновременно с определением направления магнитного поля Земли можно найти также и его интенсивность. Для этого достаточно сравнить силу остаточного термомagnetизма древних образцов с силой остаточного magnetизма, появляющегося после обжига образца в наше время (интенсивность намагничения пропорциональна силе намагничивающего поля до тех пор, пока оно достаточно слабое). Сравнивая отношение интенсивностей древних и современного магнитных полей Земли, полученное для последовательного интервала температур, можно обнаружить, имело ли место минералогическое изменение пород по сложению и составу за период, прошедший со дня первого обжига¹⁴. Результаты, полученные с помощью такой техники, показали, что во Франции сила магнитного поля Земли за последние две тысячи лет уменьшилась примерно вдвое. Так как найденное из измерений на образцах наклонение силовых линий древнего магнитного поля Земли приблизительно совпало со значением угла наклона, соответствующим полю диполя, наиболее очевидная интерпретация результата состоит в предположении о том, что имело место общее уменьшение силы магнитного поля диполя. Из того, что магнитное поле отражает падающие на Землю космические лучи, сле-

дует, что такое сильное изменение земного магнетизма должно было бы привести к систематической ошибке в определении возраста по содержанию радиоактивного углерода. Однако наблюдаемое отсутствие такой ошибки не противоречит измерениям остаточного терромагнетизма, так как изменения напряженности магнитного поля Земли могли быть настолько краткосрочны по сравнению с периодом полураспада радиоактивного углерода (5800 лет), что были не в состоянии привести к сколько-нибудь заметному изменению равновесной концентрации радиоактивного углерода.

Геологические измерения

Измерения остаточного терромагнетизма ни в коем случае не ограничиваются археологическими образцами. Лава, оставленная вулканическими извержениями, дата которых известна, является другим источником доказательств (см., например, работу Шевалье¹⁹ об извержении вулкана Этна), хотя неоднородность в направлениях магнитного поля вблизи вулкана увеличивает ошибки измерений. Гораздо более важной для геофизиков задачей является изучение условий, существовавших в прошлые геологические эпохи. Информацию о них можно получить при исследовании магнетизма горной породы. Дело в том, что остаточный терромагнетизм, как это следует из ранее изложенного, возникает в горной породе вулканического происхождения в тот период, когда она остывает и затвердевает. Кроме того, остаточное магнитное поле обнаружено также в осадочных породах; это является результатом выстроенности в момент образования осадка большинства составляющих породу намагниченных частиц. Образцы, взятые из данного геологического пласта, соответствуют слишком большому интервалу времени, чтобы дать информацию о вековых изменениях земного магнетизма; однако среднее направление остаточного магнитного поля, результирующие значения магнитного склонения и угла наклонения соответствуют магнитному диполю, совпадающему с осью вращения Земли. Угол склонения поэтому должен равняться нулю (что означает идентичность магнитного северного полюса и истинного Северного полюса), в то время как угол наклонения I , связанный с широтой λ соотношением

$$\operatorname{tg} I = 2 \operatorname{tg} \lambda,$$

изменяется от 0° на экваторе до 90° на полюсах.

В действительности найденное направление остаточного магнетизма иногда довольно сильно отличается от ожидаемого. Например, для горной породы Британии в триасский период (т. е. около 170 млн. лет назад) остаточное магнитное склонение равно 34° к востоку, а соответствующий угол наклонения составляет 25° . Такому углу наклонения, согласно только что приведенному соотношению, отвечает 13° северной широты — примерно на 40° ближе к экватору, чем в настоящее время.

Указанная величина магнитного склонения объясняется предположением о том, что со времени образования горных пород Британия сместилась на 34° по часовой стрелке.

Другие изменения остаточного магнетизма согласуются с предположением о том, что Индия, Южная Африка, Южная Америка и Австралия в свое время группировались вокруг Южного полюса. Эта идея была выдвинута геологами, опиравшимися на тот факт, что 200 млн. лет назад природные условия в этих странах благоприятствовали существованию ледника. Результаты магнитных измерений образцов, относящихся к другим геологическим эпохам, также подтверждают гипотезу «блуждающих полюсов».

Исследования приводят к еще более поразительному выводу, а именно о том, что в прошлом земное магнитное поле было полностью обращено, т. е. диполь, характеризующий это поле, так же как и сейчас, совпадал с осью вращения Земли, но его направление было противоположно теперешнему его направлению. Процесс обращения направления земного магнетизма по геологическим масштабам произошел очень быстро (вероятно, за период меньше 10 000 лет), причем противоположное направление перед этим сохранялось примерно в течение 500 000 лет.

Природный остаточный магнетизм для археологии интереса не представляет, за исключением того случая, когда речь идет о магнетизме, зафиксированном в глине, состоящей из ряда слоев. В ней, как и в осадочной горной породе, определенным образом ориентированы намагниченные частицы, находившиеся до образования осадка во взвешенном состоянии.

Методом подсчета числа годичных слоев можно определить время образования данного слоя глины, что кажется весьма ценным с точки зрения нахождения кривой вековых изменений магнитного поля. К несчастью, угол наклона довольно сильно зависит от посторонних факторов. Величина же магнитного склонения не меняется при условии, что вода, из которой образовались осадки, имела достаточно низкую температуру.

8. МАГНИТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРЕДМЕТОВ

Глиняные печи для обжига и сушки предметов

Даже если полностью отвлечься от той роли, которую играют глиняные печи для обжига и сушки при определении величины и направления геомагнитного поля в древности, следует отметить их важность для чисто археологических исследований. Осколки предметов гончарного производства благодаря своей прочности и обыденности часто являются основными факторами, указывающими на возможное место исторических раскопок. Обнаружение в различных местах гончарных изделий сходных типов стимулирует поиски связей между соответствующими областями; при этом по возрасту предметов гончарного производства, найденных в одном месте, можно установить возраст гончарных изделий из другого места. Тем самым осколки глиняных предметов как бы аналогичны набору стандартных образцов, применяемых в физике.

Источником такого набора глиняных образцов является печь для обжига и сушки. Действительно, так как такая печь пригодна для работы в течение периода несколько меньше года, обнаружение различных типов гончарных изделий, вышедших из одной и той же печи, является непосредственным доказательством равенства их возрастов.

Глиняные печи сохранились до наших дней благодаря тому, что их, для упрощения конструкции и получения хорошей термоизоляции, обычно закапывали в землю.

С другой стороны, это обстоятельство затрудняет их обнаружение, так как поверхность земли, соответствующая времени работы печи, обычно расположена на несколько футов ниже настоящей поверхности земли, так как слой почвы со временем постепенно утолщается; обычно при раскопках не имеется никаких признаков, позволяющих найти эту прежнюю поверхность земли, за исключением тех, которые может дать анализ распределения осколков гончарных изделий.

Даже для сооружения маленькой печи для обжига и сушки требуется несколько центнеров глины. Остаточный термомагнетизм, приобретае-

мый таким количеством глины в процессе обжига, достаточно велик, чтобы сильно увеличить напряженность магнитного поля на поверхности земли в том месте, где находится печь. Практически увеличение напряженности поля на расстоянии двух ярдов вверх от печи равно примерно 0,001 э, что составляет 1/500 долю напряженности земного магнитного поля. Такое изменение легко обнаружить с помощью обычного аstaticкого магнетометра; однако невозможность быстрых поисков с помощью

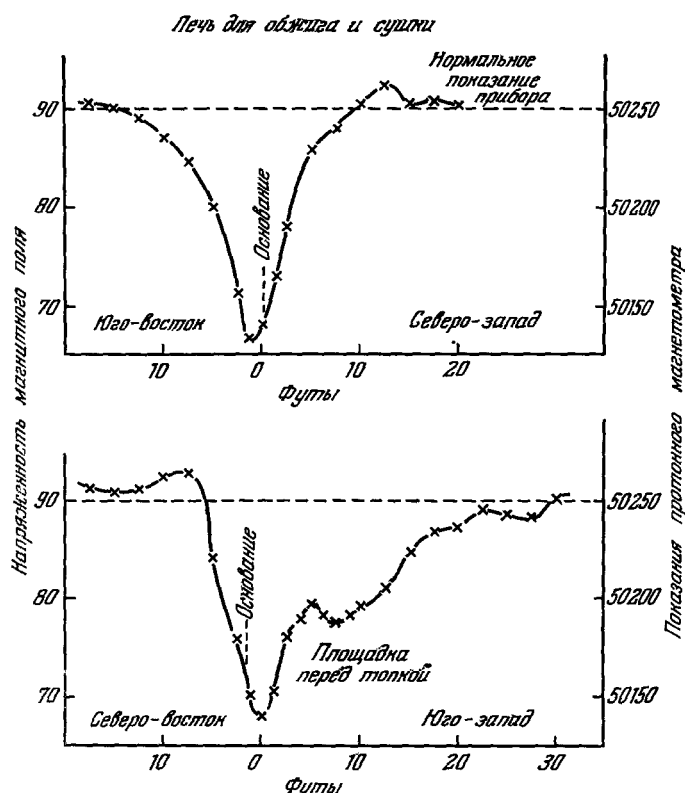


Рис. 11. Магнитная аномалия на месте локализации печи для обжига и сушки предметов гончарного производства.

На рисунке показаны результаты исследования магнитной аномалии в двух направлениях. При раскопках этих аномалий была найдена печь для обжига и сушки гончарных изделий римско-британского производства. Основание находится в центре печи, содержание в нем обожженной глины наибольшее. Вертикальная шкала характеризует изменение напряженности магнитного поля. На ней отложены обратные единицы, что соответствует смыслу показаний протонного магнетометра, показания которого при уменьшении напряженности увеличиваются ($\gamma = 10^{-5}$ э).

такого прибора является очень серьезным недостатком. Поэтому магнитный метод для определения местоположения глиняных печей стал практически применимым лишь после того, как был изготовлен портативный вариант недавно изобретенного протонного магнетометра.

Идея измерений с помощью этого прибора состоит в наблюдении свободной прецессии протонов в магнитном поле Земли, которая возникает из-за наличия у протонов спина и магнитного момента. Хотя только что сказанное указывает на сложность процесса наблюдения, свободную прецессию протонов фактически удалось обнаружить уже в 1953 г. в лабораторных условиях²⁰. Этот прибор оказывается простым и удобным

в обращении: при использовании транзисторов его вес можно уменьшить до 20 фунтов.

Обстоятельства, стимулировавшие использование протонного магнетометра для археологических исследований (в геологии этот прибор в то время уже применялся), убедительно иллюстрируют необходимость быстрого производства измерений. В 1958 г. Великая Северная дорога (близ Уотер-Ньютона в Хантингдоншире) в результате перестройки прошла через окраину бывшего римского лагеря. Из карт, найденных при раскопках в 1828 г., следовало, что на протяжении двух миль вдоль новой дороги, возможно, находились несколько глиняных печей, которые были предназначены для обжига особо окрашенных (касторовских) гончарных изделий римско-британского производства. Шансы найти эти несколько печей путем пробных раскопок, производимых на площади 35 акров в выбранных наугад местах, были, очевидно, ничтожны. Охват такой области даже с помощью магнитных искателей также не является легким делом, так как показания приборов необходимо записывать хотя бы с интервалами в 5 футов, что требует производства 60 000 измерений.

Пользуясь протонным магнетометром, можно делать 6 измерений в минуту, так как производство измерений с этим прибором не требует, в отличие от процесса измерений с помощью магнетометров других типов, процедуры выравнивания. Это дает возможность исследовать всю область в течение нескольких недель, в то время как для измерений магнетометрами других типов на обследование области в 35 акров пришлось бы затратить около года.

В результате обследования было обнаружено семь печей, шесть из которых находились на расстоянии около 100 ярдов друг от друга, что подчеркивает, насколько важным было исследование всей области. На рис. 11 приведены результаты детальных измерений магнитного поля при пересечении места, в котором находилась одна из глиняных печей; ее местонахождение было обнаружено в результате серии предварительных измерений. Из рисунка видно, что предварительные измерения следует проводить самое большее через каждые 5 футов. Для нахождения более мелких сооружений, таких, как горны и небольшие печки, которые также можно обнаружить благодаря их остаточному тормомагнетизму, интервалы между измерениями необходимо значительно уменьшить.

Я м ы и р в ы

Кроме использования обожженной глины, с помощью магнитных методов можно определять местоположение засыпанных ям и рвов. Это возможно благодаря появлению неоднородностей в магнитном поле, возникающих не из-за наличия остаточного магнетизма, а потому, что вещество, наполняющее яму или ров, имеет более высокую магнитную восприимчивость, чем порода, в которой они вырыты. Наполняющее вещество представляет собой либо верхний слой почвы, т. е. осадочную породу, попавшую в яму (или ров) за время, пока она была открыта, или же возникает в результате намеренного наполнения ямы домашним скарбом, отбросами и т. д. Это особенно интересно для археологии, так как в яме, набитой ненужными домашними вещами, собрано множество предметов, использовавшихся одновременно. Повышенная магнитная восприимчивость, характерная для наполненных ям, возникает в результате тонкого механизма, предназначенного как бы самой природой для использования в археологии, а именно для определения местоположения таких ям с помощью магнитных методов. Чем мрачнее и грязнее содержимое ямы, т. е. чем больше всевозможных отбросов в ней находится, тем силь-

нее создаваемая ею неоднородность магнитного поля. Так, например, магнитная восприимчивость ямы, наполненной чистой породой (известняком, глиной, мелом, гравием и т. д., за исключением породы вулканического происхождения), составляет $10^{-6} \div 10^{-5}$ ед. э. д. с. на грамм-молекулу; для ямы, наполненной верхним (осадочным) слоем почвы, она увеличивается до 10^{-4} ед. э. д. с. на грамм-молекулу. Магнитная восприимчивость ямы, наполненной хозяйственными отбросами, достигает уже 10^{-3} ед. э. д. с. на грамм-молекулу.

Согласно работам ^{21, 22}, повышенная магнитная восприимчивость поверхностного слоя почвы возникает благодаря превращению окиси железа, содержащейся в почве, из слабо ферромагнитной формы, а именно красного железняка ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), в обладающую большой магнитной восприимчивостью форму маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Превращение имеет место в результате восстановления красного железняка до магнитного железняка Fe_3O_4 с последующим окислением его в маггемит. Были рассмотрены два механизма этого процесса. Первый из них осуществляется при обычных температурах, причем на различные фазы процесса оказывает влияние степень влажности почвы. Именно, процессу восстановления благоприятствует сырость, в то время как процесс окисления требует сухости почвы. Второй механизм, как указано в работах ^{21, 22}, наиболее существенный, является результатом обжига почвы, который имеет место при расчистке лесистых участков под пашню путем сжигания растущего на этих участках леса. Считается, что это был общепринятый метод, применявшийся в древности при возделывании земли. Несмотря на высокие температуры, возникновение аномалий происходит благодаря мгновенному изменению магнитной восприимчивости, а не из-за появления остаточного термомagnetизма: дело в том, что последний эффект в процессе возделывания земли уничтожается.

Каков бы ни был механизм возникновения аномалий, на практике он приводит к тому, что засыпанной яме поперечником и глубиной в один ярд соответствует аномалия магнитного поля примерно 10^{-4} э. Эта величина варьируется в зависимости от черноты наполняющего яму вещества: степень черноты важна, так как она указывает, как много черного зема и продуктов горения содержится в наполняющей яму породе. Величина аномалий значительно выше порога чувствительности протонного магнетометра, который способен обнаруживать неоднородности магнитного поля меньше 10^{-5} э. Она также выше случайных флуктуаций магнитного поля при движении от точки к точке; эти флуктуации, вероятно, обязаны своим возникновением изменениям структуры или толщины поверхностного слоя почвы.

Более серьезное значение имеют природные аномалии, возникающие, например, из-за образования каналов в меловом слое почвы. Их иногда довольно трудно отличить от аномалий, вызываемых небольшими ямами; это не относится к тем случаям, когда субстрат имеет вулканическое происхождение, так как при этом любая археологически интересная аномалия пренебрежимо мала по сравнению с остаточным термомagnetизмом горной породы. Величина природных аномалий, имеющих протяженность, сравнимую с протяженностью археологически интересных аномалий (т. е. от 3 до 10 футов), обычно не превышает 10^{-4} э.

Кроме трудностей, связанных с варьированием магнитного поля от точки к точке, вызываемыми указанными изменениями природных условий, имеются также трудности, связанные с довольно нерегулярными суточными изменениями магнитного поля, возникающими благодаря наличию в верхних слоях атмосферы ионизационных токов. Во время сильного магнитного шторма напряженность за несколько десятков секунд

может изменяться на 10^{-4} э. Ясно, что магнитное исследование в этом случае эффективно только при автоматическом учете поправок, возникающих за счет этих изменений. Последнее можно сделать с помощью дополнительного магнетометра, установленного в определенном пункте, или же с помощью градиометров некоторых типов (см. ниже). Сильные магнитные штормы, к счастью, редки, и, так как при нормальных условиях участок земли, достаточно большой по сравнению с размерами археологически интересных аномалий (например, 50 футов \times 50 футов), обследуется довольно быстро (в течение 15 минут), эффектом изменения магнитного поля со временем можно пренебречь. Отметим, что за неоднородности, подобные тем, которые обязаны своим возникновением магнитным штормам, ответственны также электропоезда и трамваи, работающие на постоянном токе.

Д в а п р и м е н е н и я

Методы определения местоположения ям особенно полезны для исследования укреплений, расположенных на холмах и относящихся к железному веку. Хотя вид крепостных валов является достаточно наглядным свидетельством агрессивности, сопутствовавшей тому времени (хорошим примером является Мейден-Касл *)), факты, проливающие свет на более тонкие детали, найти уже гораздо труднее. Пространство внутри крепостного вала занимает обычно десять — двадцать акров; такая площадь, к сожалению, недоступна археологическому обследованию. Поэтому фотографирование указанных укреплений с воздуха обычно многого не дает.

На рис. 12 показано распределение магнитных аномалий на одном из первых укреплений, обследованных с помощью протонного магнетометра. На участках, соответствующих примерно двенадцати таким аномалиям, были произведены раскопки и действительно обнаружены ямы во всех случаях, кроме двух. Последние соответствовали обнаружению колодца и железной кочерги (или же перекладины от котла). Объем земляных работ, необходимых для того, чтобы найти то же самое количество археологических предметов путем пробных раскопок в выбранных наугад местах, потребовал бы таких средств, о которых археологам сегодня не приходится и мечтать. Рвы обычно обнаружить не так просто, как ямы, так как наполняющая их порода, как правило, однородна, состоит из осадочных пород и обломившихся частей крепостного вала, а не из всевозможных отбросов. Возникающие в этом случае аномалии довольно малы, порядка $5 \cdot 10^{-5}$ э или еще меньше; однако тот факт, что ров обычно имеет большую протяженность, помогает его отождествлению магнитными методами (что относится также и к фотографиям, сделанным с воздуха). Иллюстрацией этого являются недавние исследования близ Веруламиума **).

В указанном случае мощный оборонительный ров на протяжении мили проходил как раз в тех местах, где магнитное поле менялось благодаря возмущениям, создаваемым изолированными источниками, имеющими как археологическое, так и неархеологическое происхождение. Раскопки, производившиеся в 30-х годах нашего века, основывались на предположении, что более ранние оборонительные укрепления, относящиеся к I в. н. э., расположены снаружи построенной впоследствии

*) Мейден-Касл (буквально — Девичий Замок) — древнее укрепление в Дорсетшире (Англия).

**) Веруламиум — в древности римско-британский город, был расположен на территории Хартфордшира близ современного города Сент-Олбанс.

городской стены. Однако в 1955 г. в связи с модернизацией дороги, ведущей в Блюахасхилл, был обнаружен древний оборонительный ров, проходящий внутри городской стены. Отметим, что этого открытия нельзя было бы сделать методом пробных раскопок в выбранных наугад местах, так как, даже если отвлечься от всего остального, оказалось, что дорога проходила по земле, принадлежавшей спортивной корпорации.

В 1959 г. обследование соседней с уже открытой частью рва секции с помощью протонного магнетометра указало на аномалию, величина

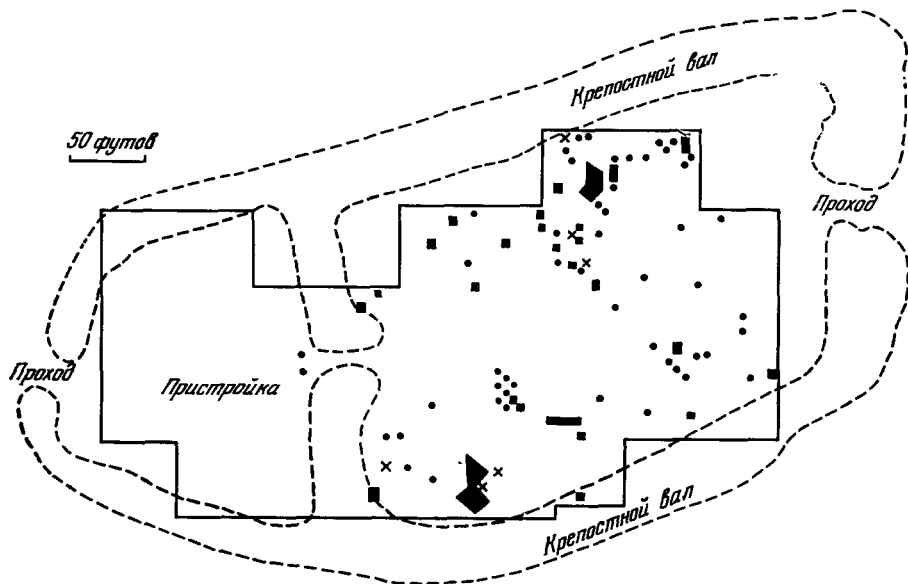


Рис. 12. Магнитная карта расположенного на холмах укрепления, относящегося к железному веку.

Магнитное исследование ясно показывает, что только главная часть форта использовалась для повседневной жизни; пристройка скорее всего использовалась для содержания скота. Раскопки двенадцати мощных аномалий в большинстве случаев приводили к обнаружению ям. ■ — резкое увеличение магнитного поля ($3 \cdot 10^{-4}$ э); ● — слабое увеличение магнитного поля (от 10^{-4} до $3 \cdot 10^{-4}$ э); × — слабое уменьшение магнитного поля.

которой оказалась несколько меньше 10^{-4} э. Эта аномалия проходила по тем местам, где впоследствии были построены площадки для игры в регби и первые одиннадцать крикетных площадок. В середине неприкосновенных 22 ярдов аномалия под прямым углом поворачивала и затем шла вплоть до искусственного озера; она прерывалась лишь в том месте, которое соответствовало пересечению с Уотлинг-стрит. Это направление, прослеженное с помощью протонного магнетометра — и впоследствии подтвержденное в нескольких местах раскопками (но не на крикетной площадке), — следует теперь интерпретировать как границу города, относящегося к I в. н. э. Этот город целиком лежит внутри городской стены, относящейся к более позднему времени.

Протонный магнетометр

Свободная прецессия протонов уже была подробно описана²³, однако резюме основных понятий может оказаться для некоторых читателей полезным. Так как протон имеет магнитный момент (равный $1,4 \cdot 10^{-3}$ ед. CGSM), он обладает также соответствующим угловым моментом, который

имеет тенденцию выстраиваться вдоль направления силовых линий магнитного поля Земли. Однако гироскопические свойства, связанные с наличием спина у протона, препятствуют немедленному выстраиванию, и вектор магнитного момента вращается по спирали до тех пор, пока постепенно не займет свойственного ему направления. Такое вращение подобно вращению волчка (рис. 13). В случае протона частота прецессии пропорциональна напряженности магнитного поля. Она равна примерно 2000 *гц* при напряженности магнитного поля 0,48 э (0,48 э — средняя величина напряженности земного магнитного поля в Британии). Для того чтобы обнаружить прецессию, необходимо иметь большое количество протонов, прецессирующих в фазе. Обычная вода содержит в 1 см³ примерно столько же протонов, сколько любая другая жидкость, за исключением жидкого водорода. Экспериментальное устройство, используемое при обнаружении прецессии, представляет собой четвертьлитровую

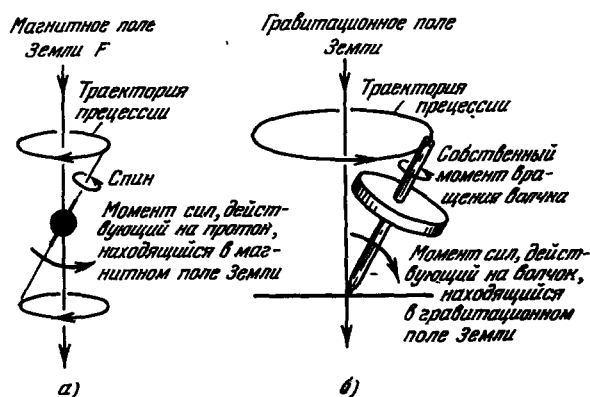


Рис. 13. Прецессия: а) протона в вертикальном магнитном поле; б) вращающегося волчка.

колбу с дистиллированной водой, вокруг которой намотана медная проволока так, что она образует катушку из 1000 витков. При прохождении через эту катушку тока силой ~ 1 а создается поляризационное поле напряженностью в несколько сотен эрстед, направленное вдоль оси колбы; оно ориентировано перпендикулярно силовым линиям магнитного поля Земли, для чего колба устанавливается так, что ее ось горизонтальна и направлена с востока на запад. Поляризационное поле стремится ориентировать параллельно магнитные моменты протонов, хотя из-за теплового движения на самом деле эффективно ориентируется лишь один протон из десяти миллионов. Ток следует пропускать в течение двух-трех секунд, после чего его необходимо быстро выключить. Теперь моменты прецессируют, в результате чего в катушке создается переменное электромагнитное поле напряжением около микровольта. Сигнал поступает на вход мощного усилителя с малым уровнем шумов, выход которого подключен к частотомеру. Из-за неоднородностей внешнего и внутреннего полей прецессия постепенно становится некогерентной, в результате чего в течение нескольких секунд сигнал затухает. Однако с помощью описанной методики можно измерить частоту сигнала, соответствующего прецессии 1 : 50 000, за время меньше половины секунды. После усиления сигнал обрезаается до прямоугольного, после чего он поступает на десятикаскадную бинарную цепь. Такая цепь уменьшает частоту в $1024 (2^{10})$ раз, поэтому результирующая прямоугольная амплитуда имеет частоту приблизительно 2 *гц*. Получившийся сигнал посту-

пает на ключ, который устроен таким образом, что цепь его замкнута лишь в течение времени, соответствующего первым 1024 циклам прецессии, после чего цепь размыкается. Когда цепь замкнута, на десятичную пересчетную схему поступает сигнал от генератора на 100 кГц с кварцевой стабилизацией частоты.

Таким образом, регистрируются те импульсы генератора, которые поступают в течение периода, необходимого для совершения 1024 циклов прецессии. Возникшее в результате работы пересчетной схемы пятизначное число, каждая цифра которого соответствует определенному счетчику, обратно пропорционально силе магнитного поля, в котором прецессируют магнитные моменты протонов.

Включение поляризованного тока и измерения выполняются автоматически, так что оператору остается лишь считывать цифры. Детектор с колбой, смонтированный на подходящем штативе, выносится вторым оператором на исследуемый участок земли. При использовании транзисторов для питания прибора может употребляться магнитный 12-е аккумулятор.

«Б л и п е р»

В протонном магнетометре абсолютная величина напряженности магнитного поля получается сравнением частоты протонной прецессии с частотой генератора с кварцевой стабилизацией частоты. Однако, когда ищется местонахождение археологических предметов, обычно ожидается,

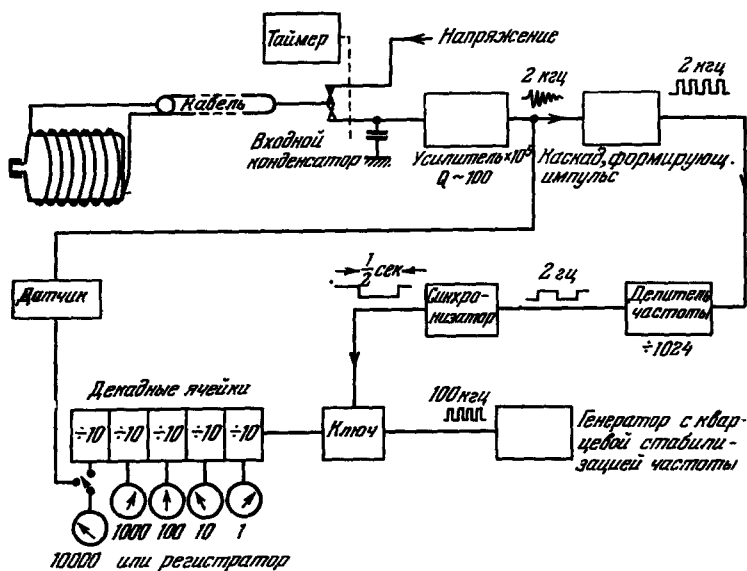


Рис. 14. Блок-схема протонного магнетометра.

Цифры на шкале каждого из пяти приборов объединяются в одно пятизначное число, обратно пропорциональное напряженности магнитного поля.

что напряженность поля на расстояниях, сравнимых с размерами области локализации предметов, сильно меняется. Удобно поэтому обойтись без генератора с кварцевой стабилизацией частоты, если сравнить между собой частоты протонной прецессии, соответствующие двум детекторам с колбой, укрепленным на разных концах штатива длиной 6—7 футов. Простейшим методом сравнения является сложение сигналов от обоих детекторов и наблюдение частоты биений (рис. 14, 15).

Обе колбы питаются общим поляризованным током, так что при его выключении начальные сигналы от детекторов находятся в фазе. Если колбы помещены в магнитные поля одинаковой силы, амплитуда суммарного сигнала в два раза больше амплитуды каждого из индиви-

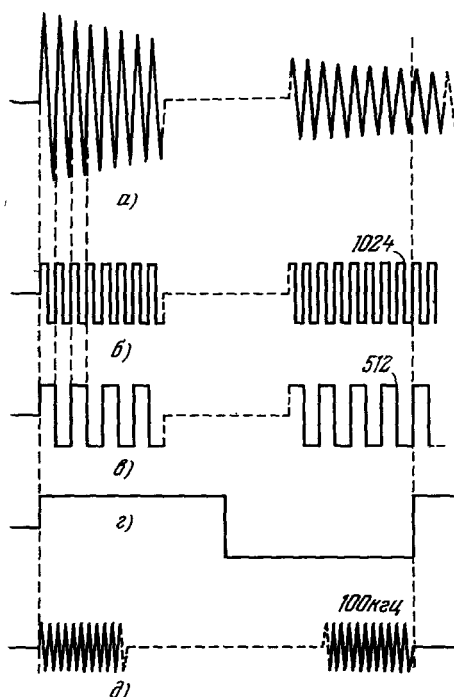


Рис. 15. Формирование сигнала в протонном магнетометре.

а) Сигнал из усилителя, $f = 2000$ гц; б) сигнал после придания ему прямоугольной формы; в) результат деления частоты на два, $f = 1000$ гц; г) результат деления частоты на 2^{10} , $f = 2$ гц; д) напряжение, подаваемое с генератора частоты 100 кгц на селектор.

или громкоговоритель. Длительность сигнала определяется с помощью секундомера. Таким путем можно сильно уменьшить стоимость, вес и сложность устройства описанного прибора.

На рис. 16 приведена фотография этого прибора. Он представляет собой чрезвычайно простое устройство, с помощью которого можно наблюдать ядерный эффект, который еще 10 лет назад никто не смог бы обнаружить.

Д и ф ф е р е н ц и а л ь н ы й м а г н е т о м е т р

Дифференциальный магнетр употреблялся в течение многих лет в геологических исследованиях, особенно при исследованиях с воздуха. Недостатком этого прибора является необходимость употребления сервомоторов, которые предназначены для точного ориентирования детекторных элементов по отношению к магнитному полю.

Однако при использовании двух детекторов, точно так же как это делается в «блипере», для измерения градиента поля достаточно при-

дуальных сигналов, причем время затухания сигнала, как обычно, равно 3 сек. Если же напряженности полей размыкаются достаточно сильно, то возникают биения. Для мало отличающихся напряженностей, когда различие порядка 10^{-4} э, частота биений составляет всего лишь 0,4 гц. Тем не менее даже такое слабое различие между полями может быть обнаружено, так как при различии напряженностей полей на 10^{-4} э суммарный сигнал затухает уже через 1,25 сек, что делает этот случай легко отличимым от случая равных идентичных полей. Время затухания может быть измерено с помощью электрических методов, в результате чего становится возможным точное определение величины, на которую разлагаются напряженности сравниваемых полей.

Для археологических работ такой точный прибор вряд ли нужен: в этом случае вполне достаточно установить присутствие неоднородности в магнитном поле и произвести ее грубую количественную оценку. Упрощенный вариант — «блипер» *), предложенный в работе ²⁴, представляет собой усилитель, предназначенный для того, чтобы суммарный сигнал мог поступать в наушники

*) «Блипы» — жаргонное название слышимых в телефоне биений звука.

ближенного выстраивания, если оба детектора укреплены на противоположных концах негнущегося штатива. Такой инструмент был спроектирован С. Локе и впервые использовался Э. Вайтрон при археологических исследованиях в Иордании, предпринятых в связи с изучением



Рис. 16. «Блипер».

Две колбы детектора помещены на разных концах штатива, изображенного на правом снимке. Суммарный сигнал от них усиливается, после чего поступает в наушники. В местах, где магнитное поле становится неоднородным, частота сигналов детекторов различна, в результате этого в наушниках слышны биения.

свитков Мертвого моря. Отметим в заключение, что «Блипер» не чувствует сильных неоднородностей магнитного поля, таких, как неоднородности, вызываемые суточными изменениями или же электропоездами, работающими на постоянном токе.

9. ДРУГИЕ МЕТОДЫ АРХЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Метод измерения удельного сопротивления

Электрическое удельное сопротивление почвы варьируется от 10 до 10^3 ом·см, в зависимости от содержания в ней воды, в то время как для горной породы его величина оказывается больше 10^4 ом·см. Следовательно, измеряя эффективное сопротивление цепи между двумя зондами, воткнутыми в землю, мы можем обнаружить некоторые неоднородности, а именно: наполненные почвой канавы в скалах, фундамент стены, подземные ходы, могилы, пещеры. На практике необходимо пользоваться четырьмя зондами, чтобы устранить эффект варьирования контактного сопротивления. Типовая схема соответствующего устройства приведена на рис. 17. Ток проходит между двумя внешними зондами, причем

разность потенциалов двух внутренних зондов балансируется противоположным по фазе напряжением, пропорциональным току между внешними зондами. Чем больше эффективное сопротивление земли, тем больше отношение разности потенциалов между двумя внутренними зондами и тока, текущего между внешними зондами, и тем большую часть сопротивления необходимо ввести в цепь, чтобы стрелка детектора установилась на нуле. Глубина исследуемого слоя почвы должна равняться примерно расстоянию между зондами. Имеются различные типы подобных приборов. Наименьший из них, работающий на транзисторах, свободно уместится на ладони; для его питания достаточно батарейка от карманного фонарика с напряжением 4,5 в.

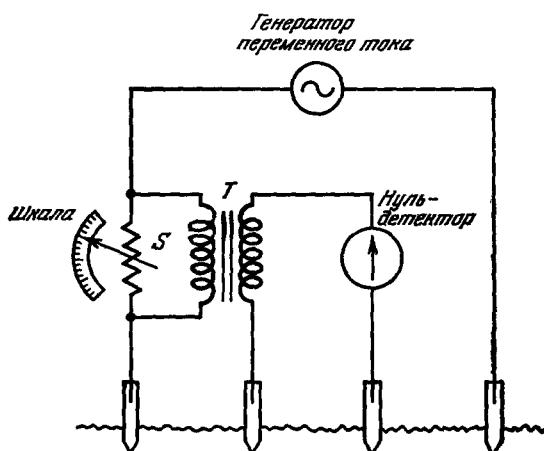


Рис. 17. Измерители удельного сопротивления почвы.

Четыре зонда втыкаются в землю на разных расстояниях, и отношение разности потенциалов между двумя внутренними зондами и тока, протекающего через внешнюю пару зондов, пропорционально удельному сопротивлению почвы.

Интересным применением метода измерения удельного сопротивления является исследование императорской казны, потерянной императором Джоном в 1216 г., когда необычайно высокий прилив снес его обоз с дамбы, пересекавшей эстуарий Ваши. Эстуарий, о котором идет речь, уже давно высох; от дамбы не осталось никакого видимого следа;

однако методом измерения удельного сопротивления удалось получить факты, на основании которых можно установить ее местоположение.

Оказалось, что дамба представляла собой естественный нанос, образовавшийся в результате подъема глиняного русла реки и состоявший из слоя песка толщиной 40 футов; так как удельное сопротивление песка несколько больше, чем удельное сопротивление глины, этот нанос можно было обнаружить. Местонахождение сокровищ, однако, остается неизвестным; кажется маловероятным, что относительные размеры той части металла, которая сохранилась до нашего времени, окажутся достаточно большими, чтобы вызвать сколько-нибудь заметное отклонение величины удельного сопротивления от нормальной.

Электромагнитные методы

Очень удобным инструментом для обнаружения закопанного металла являются употреблявшиеся в войну миноискатели. Обычный принцип их работы состоит в том, что взаимная индукция двух катушек слегка меняется, когда поблизости от них оказывается кусок металла (что связано с возникновением вихревых токов). К несчастью, их чувствительность падает пропорционально шестой степени глубины, так что на глубине больше двух футов можно обнаружить присутствие только достаточно больших металлических предметов.

В США были разрекламированы металлические детекторы, о которых писали, что они являются основными приборами, необходимыми каждому охотнику за кладами. В Британии это оборудование служило более прозаическим целям; оно предназначалось инженерам, находя-

щимся на государственной службе, для обнаружения трубопроводов. Такие детекторы обычно состоят из передающей катушки, установленной под прямым углом к принимающей катушке, находящейся от нее на расстоянии около двух ярдов; обе они жестко смонтированы на одной и той же поперечной станине. Принимающая катушка установлена так, что нулевое показание прибора соответствует отсутствию в земле металла.

Вблизи закопанного металла, в связи с появлением в нем вихревых токов, условие равновесия нарушается, в результате чего возникает сигнал. При этом используется несущая частота около 100 кГц, которая модулируется, чтобы стало возможно распознавание металлического предмета по звуку. Конструкторы этого прибора утверждают, что подобный детектор в состоянии обнаружить сундук, наполненный слитками золота и серебра, если он находится на глубине до 10 футов. К сожалению, такие находки в археологии довольно редки.

Сейсмические методы

В геологии большое значение имеют сейсмические методы разведки. При этом взрывают капсулы со взрывчаткой, и время, необходимое для того, чтобы отраженные волны вернулись обратно на поверхность, указывает глубину различных геологических пластов. Такие методы являются слишком громоздкими для применения в археологии, однако Университетским музеем в Филадельфии и фондом Лерисси в Италии сейчас разрабатываются более тонкие методы.

С другой стороны устаревшая техника «ошибки», которая состоит в том, что земля уминается тяжелой чугунной бабой, в опытных руках может оказаться очень полезной для ровной местности.

Могила в Иерихоне были обнаружены местными жителями, вооруженными лишь мотыгами, и это оказалось более эффективным, чем использование методов современной науки!

10. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хорошо известно, что способности и степень активности хорошо обученного археолога, используемые им при интерпретации полученных доказательств, относятся как раз к тому типу инструментов, которые трудно усовершенствовать. Тем не менее имеется ряд областей, в которых применение физики играет очень важную роль.

При этом используются, в частности, перечисленные выше методы: метод определения возраста по содержанию радиоактивного углерода, магнитный метод, метод обнаружения локализации археологических предметов. Значение этих методов в качестве вспомогательных для археологии научных дисциплин признается обычно довольно охотно. Меньше, однако, ценится тот вклад, который археология может внести и внесла в естественные науки.

Куски дерева, извлеченные из египетских могил, помогли установить постоянство интенсивности космических лучей. Древние глиняные изделия при археологических раскопках являются своего рода летописями, они могут дать возможность установить, как в прошлом менялось земное магнитное поле. Если перейти к более практическим примерам, известно, что потребности археологии стимулировали технический прогресс при использовании явления свободной прецессии протонов в аналитических методах и особенно в спектрометрии рентгеновского излучения.

С первого взгляда бросается в глаза обилие мостов, перекинутых через пропасть, якобы разделяющую искусство и науку. Для реализации

потенциальных возможностей, к которым может привести тесная связь между ними, по инициативе покойного лорда Черуэлла в 1955 г. при Оксфордском университете была основана научно-исследовательская лаборатория археологии и истории искусств. Эта лаборатория, по существу, является физической лабораторией, занимающейся прикладными проблемами, которая в процессе выполнения своей работы консультируется с археологами и сотрудничает с ними.

Значительная часть работ, описанных в I и II частях статьи, была выполнена именно в вышеупомянутой лаборатории, и тот энтузиазм, с которым были встречены эти работы, не оставляет сомнения в успехе начинания лорда Черуэлла.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. W. F. Libbi, Radiocarbon Dating, 2nd ed., University of Chicago Press Chicago, 1955.
2. W. F. Libbi, Science **133**, 621 (1961).
3. H. Godwin, Proc. Roy. Soc. B**153**, 287 (1960).
4. E. Thellier and O. Thellier, Ann. Geophys. **15**, 285 (1959).
5. W. Elsasser, E. P. Ney and J. R. Winkler, Nature **178**, 1226 (1956).
6. E. K. Ralith, R. Struckenrath, Nature **188**, 185 (1960).
7. E. H. Willis, H. Tauber, K. O. Munnich, Amer. J. Sci. Radiocarbon Suppl. **2**, 1 (1960).
8. R. H. Brill and H. P. Hood, Nature **189**, 12 (1961).
9. S. Junghans and E. Sangmeister, Germania **35**, 11 (1957).
10. E. E. Richards, K. F. Hartlay, Nature **185**, 194 (1960).
11. I. G. Folgheraiter, Arch. Sci. phys. nat. **8**, 5 (1899).
12. E. Thellier, Ann. Inst. Phys. Globe **16**, 157 (1938).
13. E. Thellier, J. Phys. **12**, 205 (1951).
14. E. Thellier, and O. Thellier, Ann. Geophys. **15**, 285 (1959).
15. L. Neel, Advances Phys. **4**, 191 (1955).
16. W. Elsasser, Revs. Mod. Phys. **28**, 135 (1956).
17. E. C. Bullard, Year Book Phys. Soc. **47** (1958).
18. S. K. Runcorn, Ann. Geophys. **15**, 87 (1959).
19. R. Chevallier, Ann. de phys. (Paris) **4**, 5 (1925).
20. M. Packard, R. Varian, Phys. Rev. **93**, 41 (1954).
21. E. Le Borgne, Ann. Geophys. **11**, 399 (1955).
22. E. Le Borgne, Ann. Geophys. **16**, 159 (1960).
23. Contemp. Phys. **3**, Feb. 1962.
24. J. Aitken, Physics and Archeology, Interscience Publ., New York and London, 1961, стр. 52—59 (см. перевод: М. Дж. Эйткин, Физика и археология, М., ИЛ, 1963).