

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

930.26+53

ВЛИЯНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК НА АРХЕОЛОГИЮ ***М. Тайт**

В статье рассмотрены приложения физики к решению археологических задач. Описано использование магнитных, электрических и электромагнитных поисковых методов для определения местоположения археологических объектов. Перечислены различные методы определения возраста находок и детально рассмотрены проблемы, связанные с радиоуглеродным датированием органических материалов и термолюминесцентным датированием керамических изделий. Описаны также методы, используемые при физическом исследовании археологических находок, в том числе минералогическое обследование, химический и изотопный анализы. Приводятся примеры использования этих методов при установлении источников керамического сырья, при исследовании металлических и каменных орудий труда, а также при выяснении способов изготовления керамики и металлических изделий.

1. ВВЕДЕНИЕ

Археология занимается реконструкцией человеческих сообществ — от первых изготовителей орудий труда примерно два миллиона лет назад и до современных обществ. За исключением последних пяти тысячелетий, эти сообщества не оставили нам никаких письменных свидетельств своего существования, так что для установления социальных, экономических и исторических аспектов развития человечества нам остается основываться лишь на результатах исследования материальных останков минувших эпох. Поэтому становится важной задачей извлечь из этих остатков как можно больше сведений, и в решении этой задачи все большую роль играют физические и биологические методы исследования¹⁻³.

Физические методы, применение которых в археологии составляет тему настоящей статьи, используются для решения трех основных видов задач. Первый из них связан с геофизической разведкой для определения местоположения таких археологических объектов, как карьеры, рвы, стены, дороги, обжиговые печи. Второй связан с физическими методами определения возраста, скажем, радиоуглеродным и термолюминесцентными методами, которые дают в руки археологу абсолютный и универсальный масштаб времени. Наконец, третий связан с физическими методами изучения археологических находок (например, каменных или металлических изделий, керамики, стекол, монет), которые могут в большой степени приумножить сведения, например, о происхождении или технологии

*) M. S. Tite, The Impact of the Natural Sciences on Archaeology, Contemp. Phys. 11 (6), 523 (1970). Перевод В. И. Рыдника.

Автор статьи М. С. Тайт — преподаватель физического факультета Эссекского университета, Великобритания.

изготовления какого-либо изделия, по сравнению с теми сведениями, что получаются из простого осмотра находок.

Первым важным приложением физики к археологии была разработка метода датирования по радиоуглероду У. Ф. Либби в 1946 г. Впоследствии в 1955 г. в Оксфордском университете была организована научно-исследовательская лаборатории археологии и истории искусств со специальной целью разрабатывать физические методы решения археологических задач, а сегодня в этой области исследований работают многие ученые во всем мире. В качестве признания этой области науки и вместе с тем в ознаменование двадцатилетней годовщины начала работ по радиоуглеродному датированию Королевское общество совместно с Британской академией организовало в декабре 1969 г. симпозиум на тему «Влияние естественных наук на археологию». Мы хотим в этой статье, основанной отчасти на материалах симпозиума, изложить некоторые новые разработки, появившиеся за последнее десятилетие.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ

Обычно первые указания на возможные места человеческих поселений может дать изучение аэрофотоснимков — обнаружение на них россыпей керамических обломков или же явно искусственных нарушений рельефа, например крепостных валов и рвов. Затем для более подробного изучения подозреваемых мест можно пустить в ход методы геофизической разведки. Они обычно приводят к более точному установлению местоположения таких археологических объектов, как шурфы, обжиговые печи, стены и т. д. Хотя эти методы все равно требуют последующих раскопок, они все же показывают археологу, где можно копать с наибольшей уверенностью.

В течение более чем десятилетия при археологических раскопках широко использовались методы магнитной разведки и электроразведки¹. В последние годы для обнаружения археологических объектов стали применяться также различные электромагнитные поисковые приборы, в их числе обычные металлоискатели.

Магнитная разведка. Магнитная разведка состоит в измерении напряженности земного магнитного поля H с точностью 10^{-3} а/м или B с точностью примерно 10^{-9} тл (т. е. относительной точностью порядка 1/50 000). Для этой цели, как правило, используется протонный магнитометр. Печи для обжига керамики или другие сооружения из обожженной глины удается обнаружить по их термоостаточному магнетизму, связанному с присутствием в глине 1—10% окиси железа. Оно вызывает местное повышение напряженности магнитного поля на 10^{-2} — 10^{-1} а/м. Аналогичное повышение напряженности поля дают шурфы и каналы, поскольку земляная насыпь вокруг них имеет более высокую магнитную восприимчивость, чем подпочва, в которой они были вырыты. Обычно восприимчивость насыпей у каналов и карьеров более чем в 5 раз выше, чем у подпочвы. Эта повышенная магнитная восприимчивость обуславливается превращением почвенной окиси железа из слабоферромагнитного гематита в форму с более сильным ферромагнетизмом — маггемит ($\alpha \rightarrow \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) в результате сжигания органического материала, что свидетельствует о присутствии человека. В противоположность этому, стены и дороги вызывают понижение напряженности местного магнитного поля вследствие пониженной магнитной восприимчивости материала стен или дорог по сравнению с восприимчивостью верхнего почвенного слоя.

Результаты магнитной разведки сложного римско-британского поселения, показанные на рис. 1, демонстрируют ряд объектов, обнаруженных подобным методом. Проведя ограниченные раскопки, удалось установить, что повышения напряженности магнитного поля были вызваны канавами (линейные аномалии), колодцами, карьерами или обжиговыми печами (аномалии по площади), а уменьшения напряженности поля связаны с дорогами (линейные аномалии) и кучками строительного камня (аномалии по площади). Отдельные стены были слишком тонки, чтобы их можно было обнаружить.

Таким образом, в описанном случае магнитная разведка не только помогла археологам выбрать подходящие площадки для раскопок, но даже смогла подсказать, что именно будет раскопано, например — дороги, так что удалось составить план всего поселения, не производя полного раскопа.

Электроразведка. В зависимости от влагосодержания электрическое сопротивление почв варьирует от 1 до 500 ом·м, а для скальных пород обычно превышает 1000 ом·м. Поэтому, воткнув в землю зонды и измерив электросопротивление между ними, можно обнаружить засыпанные землей шурфы и рвы, вырубленные в скале или врытые в землю стены и дороги. Этот метод в работе гораздо медленнее магнитной разведки, и обычно его используют только для обнаружения линейных археологических объектов. В частности, он особенно ценен там, где различие магнитной восприимчивости почв и скальных пород недостаточно, чтобы можно было пустить в ход магнитную разведку.

Электромагнитная разведка. Типичный металлоискатель состоит из вертикальной передающей катушки, питаемой непрерывным синусоидальным током, и приемной катушки, располагаемой на расстоянии 1 м от оси первой катушки перпендикулярно ей во избежание прямой наводки. Погребенные металлические предметы обнаруживаются благодаря тому, что вихревые токи, возбуждаемые в металле переменным магнитным полем передающей катушки, наводят э. д. с. в приемной катушке.

Этот метод привлек внимание археологов тем, что он позволяет избавиться от трудоемкой работы по зондированию в описанном выше обычном методе электроразведки. Его недавно исследовали Тайт и Маллинс⁴ с целью выяснить, может ли металлоискатель измерять вариации электросопротивления почв и тем самым обнаруживать канавы, стены и т. д. Теория электромагнитных колебаний, будучи применена к данной задаче, показывает, что э. д. с., наведенная в приемной катушке почвой, будет состоять из двух слагаемых. Первое из них, синфазное колебаниям

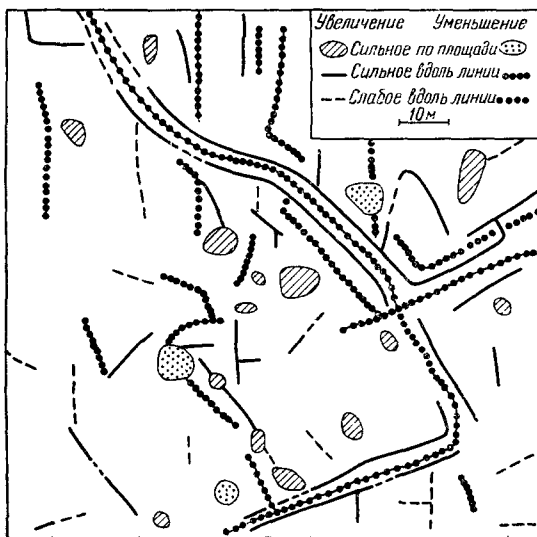


Рис. 1. Данные разведки римско-британского поселения с помощью протонного магнитометра. Разведка четко показывает систему дорог в поселении, определенную по пониженной напряженности магнитного поля. (Слабому увеличению или уменьшению напряженности поля соответствует $(1-3) \cdot 10^{-2}$ а/м, сильному — более $3 \cdot 10^{-2}$ а/м.)

напряжения в передающей катушке, пропорционально магнитной восприимчивости почвы и не зависит от рабочей частоты ν . Второе же сдвинуто по фазе на 90° относительно напряжения в передающей катушке и пропорционально ν/ρ , где ρ — электросопротивление почвы. Поэтому, если металлоискатель работает на достаточно высокой частоте (например, 200 кГц), преобладать будет вторая составляющая напряжения, и, в принципе, можно было бы обнаруживать археологические объекты по контрасту их электрического сопротивления с окружающей почвой или подпочвой. К сожалению, чувствительность этого прибора падает как шестая степень глубины, так что уже при глубине всего лишь примерно 30 см

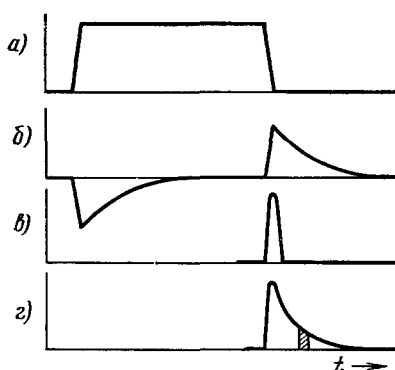


Рис. 2. Формы импульсов для металлоискателя Колани⁵.

а) Импульс первичного магнитного поля, создаваемый передающей катушкой (длительность 500 мксек, частота повторения 11 кГц); б) импульс вихревых токов, возбужденных в металлическом предмете, воспринятый вторичной катушкой; в, г) э. д. с., индуцированная во вторичной катушке непосредственно от первичного импульса и от первичного импульса вместе со вторичным (показан только эффект «отсечки» импульса передающей катушки). Заштрихованная площадь соответствует периоду, в течение которого измеряется э. д. с. в приемной катушке. Видно, что в отсутствие металлического предмета э. д. с. в приемной катушке равна нулю.

сигнал от подпочвы забьет любой «археологический» сигнал. Это накладывает весьма существенные ограничения на практическую применимость описанного метода.

Если металлоискатель работает при достаточно низкой частоте (например, 4 кГц), в нем преобладает составляющая, связанная с магнитной восприимчивостью, и тогда археологические объекты можно обнаруживать по контрасту их восприимчивости. И в этом случае сильный сигнал от верхнего слоя почвы полностью маскирует любой «археологический» сигнал с глубины более чем примерно 50 см, однако металлоискатель в таком режиме работы удалось успешно использовать в ряде археологических работ, особенно при раскопках крепости Саут-Кэдбери, где было обнаружено множество шурфов и канав. Кроме того, для археологии важны те сведения, которые этот метод дает о восприимчивости верхних слоев почвы, поскольку, если она высока, это можно связать с интенсивно заселявшимися или же «промышленно осваивавшимися» областями, где можно ожи-

дать найти следы выплавки железа или же обжига керамики. Такие зоны можно обнаружить быстро, поскольку прибор немедленно откликается на изменения восприимчивости. Отдельные же объекты в пределах этих зон можно уже затем искать с помощью более чувствительного протонного магнитометра, отсчеты которого делаются каждые 6 сек.

Недавно Колани⁵ разработал новый тип металлоискателя, передающая катушка которого питается не непрерывным переменным током, а прямоугольными импульсами тока одной полярности. Формы импульсов в передающей катушке, в приемной катушке и вихревого тока в металлическом предмете показаны на рис. 2. Возможность прямой наводки сигнала в этом приборе исключена тем, что измерение импульса э. д. с. в приемной катушке производится спустя более чем 100 мксек после окончания импульса в передающей катушке; в отсутствие металлических предметов при этом в приемной катушке нет никакого тока. Благодаря этому чувствительность описываемого металлоискателя выше, чем обычного прибора с непрерывным питанием переменным током, поскольку в новом приборе нет нужды устанавливать обе катушки строго перпендикулярно друг

другу. Кроме того, скорость затухания вихревых токов зависит только от размеров, формы и электропроводности металлического предмета, так что определение э. д. с., наводимой в приемной катушке при различных длительностях импульса в передающей катушке (например, 100, 200 и 300 мксек), позволяет найти указанные характеристики предмета.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗРАСТА

Появление физических методов датирования оказало огромное влияние на археологию. Они позволили создать абсолютную и универсальную хронологическую шкалу. До возникновения этих методов археологи были вынуждены сначала устанавливать относительные хронологические шкалы для каждой области раскопок, основывавшиеся на последовательности находок и их соотношении с различными стратиграфическими слоями. Если удавалось обнаружить находки с какими-либо резко выделяющимися особенностями при раскопках в удаленных друг от друга областях, то можно было попытаться связать локальные хронологические шкалы. В некоторых случаях такие относительные хронологии удавалось в конце концов увязать в абсолютную хронологию там, где хотя бы приблизительно были известны исторические даты; наиболее ранняя из таких хронологий относится к Древнему Египту и доведена до 3000 г. до н. э.

В настоящее время для целей датирования можно использовать многочисленные физические методы. Мы подробно обсудим далее радиоуглеродный и термолюминесцентный методы. Радиоуглеродное датирование органических материалов — наиболее важный и наиболее широко используемый сегодня метод. Несмотря на то, что обнаружили значительные различия между истинным календарным возрастом и возрастом, определенным по радиоуглероду, на этом методе основывается сейчас хронологическая шкала человеческой предистории примерно до 50 000 лет до н. э. Надежность данных, полученных термолюминесцентным методом датировки керамики, все еще предстоит окончательно доказать. Однако этот метод выглядит исключительно многообещающим и, возможно, окажет неоценимую помощь в перекрытии временного интервала от эпохи, когда радиоуглеродные данные утрачивают точность, до наших дней, особенно после 6000 г. до н. э., когда начали появляться первые керамические изделия.

Другие методы, среди которых можно назвать калий-аргоновый метод, датирование по следам осколков деления ядер и магнитное датирование, не получили в археологии сколько-нибудь значительного распространения. Первые два метода использовались для датирования осадочных пород вулканического происхождения, в которых были обнаружены ископаемые останки прачеловека в Олдовае (Танзания); они дали возраст находки 1,5—2 млн. лет до появления в этом районе первобытных людей, уже умевших изготавливать орудия труда.

Калий-аргоновое датирование⁶ состоит в измерении содержания изотопа Ar^{40} , образовавшегося в вулканической лаве в результате распада изотопа K^{40} , который имеет период полураспада 1330 млн. лет. Датирование по следам осколков деления⁷ производится путем счета «следов» в вулканических стеклах, образовавшихся при спонтанном делении урановых ядер, являющихся примесями в стеклах. Следы наблюдаются в микроскоп после протравливания стекол. Магнитное датирование¹ можно использовать на месте обнаружения построек из обожженной глины (например, печей для обжига керамики или очагов). Термоостаточное намагничивание этих объектов позволяет установить в них направление земного магнитного поля в «день» последнего разжигания огня, и, поскольку

это направление непрерывно меняется со временем, это дает основу для разработки метода датирования. К сожалению, рассчитать те изменения направления магнитного поля, которые имели место в прошлом (палеомагнетизм), нет возможности. Поэтому здесь прежде всего необходимо построить градуировочную кривую, используя для этой цели сооружения уже известного возраста. Однако все равно это ограничит применимость последнего метода античной и средневековой эпохами, для которых известны аккуратно датированные печи для обжига керамики.

Радиоуглеродное датирование. Этот метод, разработанный Либби⁸, основывается на эффекте воздействия космических лучей на земную атмосферу. Космические лучи создают нейтроны, которые превращают атмосферный азот N^{14} в радиоактивный углерод C^{14} . По своему химическому поведению радиоуглерод ничем не отличается от обыкновенного углерода; в частности, он, соединяясь с кислородом, образует тяжелую двуокись углерода, которая смешивается с обычной двуокисью углерода в атмосфере. Атмосферная двуокись углерода поступает в океаны в виде растворенных карбонатов. Растения при своем росте усваивают с помощью фотосинтеза атмосферную двуокись углерода, а животные в свою очередь поедают растения. На Земле существует равновесное содержание C^{14} : этот изотоп создается нейтронами космических лучей со скоростью около 8 кг в год, а сам он распадается на N^{14} , испуская β -частицы с энергией 160 кэв, причем период этого полураспада составляет 5730 лет. В результате C^{14} присутствует везде — в атмосфере, в биосфере (т. е. флоре и фауне) и океанах, причем 1 атом C^{14} приходится на $8 \cdot 10^{11}$ атомов обычного C^{12} .

Следовательно, указанную выше пропорцию C^{14} содержит, например, живое дерево. Однако мертвое дерево уже не отбирает двуокись углерода из атмосферы, так что теперь уменьшение в нем содержания C^{14} из-за распада уже не восполняется, и это уменьшение медленно идет — примерно на 1% каждые 80 лет. Значит, измерив отношение C^{14}/C^{12} в куске мертвого дерева и сравнив это отношение с его значением для живого дерева, можно, зная период полураспада C^{14} , определить возраст мертвого дерева.

Постоянство отношения C^{14}/C^{12} . Основное допущение, на котором основывается радиоуглеродный метод датирования, состоит в том, что отношение C^{14}/C^{12} в атмосфере и тем самым в живой природе оставалось постоянным за рассматриваемый период (приблизительно 50 000 лет). Для проверки справедливости этого предположения были сняты очень подробные ряды данных датирования по радиоуглероду на известных образцах. Это были образцы исторически точно датированного дерева из Египта и образцы, вырезанные из деревьев, точный возраст которых был установлен по годичным кольцам. Последний был определен методом дендрохронологии, основывающимся на том, что кольца на деревьях формируются ежегодно, а их толщина свидетельствует о климатических условиях в период формирования колец. В результате удается, сравнивая различные группы годичных колец, датировать ряд деревьев. Образцы были взяты из долгоживущей горной секвойи и западноамериканской сосны, годичные кольца на которых определяли возраст деревьев до 6000 лет. В живых деревьях, как оказалось, в равновесии с атмосферным содержанием C^{14} находится только внешнее кольцо, так что с точки зрения радиоуглеродного датирования внутренние годичные кольца следует считать мертвыми.

Результаты этих измерений^{9, 10} показывают, что за последние 6000 лет имели место заметные вариации отношения C^{14}/C^{12} в атмосфере. В основном эти вариации были двух типов: а) короткопериодные флук-

туации на несколько процентов, продолжающиеся в течение, по крайней мере, нескольких столетий; б) долгопериодное увеличение отношения C^{14}/C^{12} для атмосферы примерно на 14%, начиная от примерно 500 г. до н. э. и кончая 4000 г. до н. э. *).

Этим вариациям давалось то объяснение, что они отражают изменения в мощности и скорости обменных процессов в тех «резервуарах», в которых распределен C^{14} . Например, в течение ледниковых периодов перемешивание воды поверхностных и глубинных слоев океана (где вода обеднена изотопом C^{14}) происходило интенсивнее, что должно было вызывать обеднение атмосферы этим изотопом. Однако в настоящее время полагают, что эти вариации обусловлены изменениями скорости образования C^{14} из-за вариаций потока космических лучей, приходящих в земную атмосферу. Межпланетное магнитное поле, связанное с солнечным ветром (языками плазмы, выбрасываемой Солнцем), и магнитное поле Земли оба стремятся отклонить поток космических лучей прочь от Земли. Тогда усиление любого из этих магнитных полей будет означать ослабление приходящего в земную атмосферу потока космических лучей и тем самым — уменьшение скорости образования C^{14} .

В период высокой солнечной активности, когда количество пятен на Солнце достигает максимума, возрастает интенсивность солнечного ветра, а значит, и напряженность межпланетного магнитного поля. Значит, в эти периоды надо ожидать меньшего образования C^{14} . Для последних 500 лет была обнаружена приблизительная корреляция между высокой солнечной активностью и низким содержанием C^{14} в атмосфере, так что кажется вероятным, что это явление может нести ответственность за кратковременные флуктуации отношения C^{14}/C^{12} . Более того, поскольку считают возможным, что ледниковые периоды связаны с низкой солнечной активностью, следовало бы ожидать увеличения образования C^{14} в эти периоды. Тем самым высокое значение отношения C^{14}/C^{12} примерно в 4000 г. до н. э. и его последующее уменьшение могли бы свидетельствовать о низкой солнечной активности в последний ледниковый период.

Сведения о последних вариациях напряженности земного магнитного поля можно получить из измерений термоостаточной намагниченности образцов обожженной глины. Результаты¹³, полученные на образцах из Чехословакии и Турции (рис. 3), позволяют предположить, что длительное уменьшение атмосферного отношения C^{14}/C^{12} , наблюдаемое между 4000 и 500 г. до н. э., могло бы быть обусловлено увеличением напряженности магнитного поля в этот период от 0,6 до 1,6 ее значения в настоящее время.

Из сказанного ясно, что причины вариаций отношения C^{14}/C^{12} в общем еще не вполне понятны. Здесь необходимы дальнейшие исследования. В частности, были бы весьма нужными радиоуглеродные датирования образцов известного возраста, превышающего 6000 лет. Вместе с тем необходимо признать, что датирования по радиоуглероду археологических материалов оказываются далеко не абсолютными. На рис. 4 приведено приближенное соотношение между истинным календарным и определенным по радиоуглероду возрастом для периода от 1500 до 4000 г. до н. э. Видно, что вследствие долгопериодного изменения отношения C^{14}/C^{12} возраст по радиоуглероду, определенный вблизи 4000 г. до н. э., оказывается слишком малым — примерно на 600 лет меньше истинного, и что из-за кратковременных флуктуаций этого отношения датирование

*) То есть уменьшение этого отношения с 4000 г. до н. э. по 500 г. до н. э. (Прим. ред.)

по радиоуглероду оказывается неоднозначным: одному его значению может соответствовать несколько истинных календарных датировок. Однако при всем том перестройка археологической хронологической шкалы из-за этих поправок оказывается менее радикальной, чем та, что потребовалась после появления первых радиоуглеродных датировок. Следует также учитывать и то, что радиоуглеродные датировки

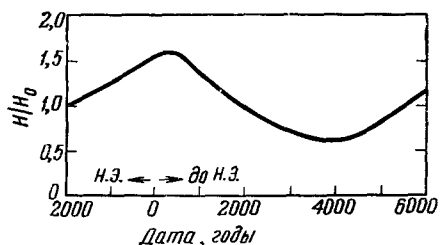


Рис. 3. Вариации земного магнитного поля в историческую эпоху ¹¹.

Отношение прошлой напряженности поля H к современной H_0 определено сравнением термоостаточной намагниченности образцов из обожженной глины со значениями, приобретаемыми после нагрева образца вплоть до температуры Кюри (500—700 °C) в современном магнитном поле.

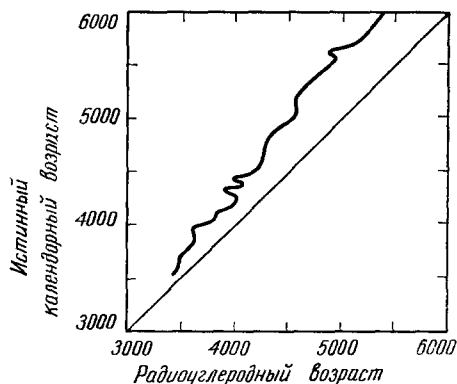


Рис. 4. Соотношение между радиоуглеродным и истинным календарным возрастом срезов западноамериканской сосны с годовыми кольцами ¹⁰.

Возраст по радиоуглероду вычислен, исходя из принятого периода полураспада 5730 лет.

позволяют построить универсальную — единую всемирную — хронологическую шкалу, поскольку любые вариации атмосферного отношения C^{14}/C^{12} имеют глобальный характер.

Термолюминесцентное датирование. Если подвергнуть ионизирующему облучению какой-нибудь неорганический непроводник, то в нем образуются свободные электроны и дырки. Часть из них захватывается дефектами кристаллической решетки (вакансиями, внедренными и примесными атомами). При нагревании этого изолятора электроны и дырки освобождаются из ловушек, и если затем происходит рекомбинация электронов и дырок в центре высвечивания, то испускается свет и происходит то, что называется термолюминесценцией. Это явление впервые наблюдал еще Роберт Бойль в XVII веке; использование этого эффекта в прикладной физике в наше время началось с работы Дэниелса и др. ¹². Основное применение явление термолюминесценции нашло в радиационной дозиметрии, особенно в радиотерапии и технике безопасности, где, измеряя выход люминесценции кристаллов фтористого кальция или фтористого лития, определяют, например, какую дозу излучения восприняли эти кристаллы с момента их последнего нагрева. Использование этого явления в геологии ¹³, в частности для определения возраста известняков, сопровождалось довольно скромным успехом. Однако использование этого эффекта для датировки античной керамики ¹⁴ показало, что, несмотря на многие присущие этому методу трудности, он обладает большими возможностями.

Принципы метода термолюминесцентного датирования иллюстрирует рис. 5. Когда обжигают сырую глину при температурах от 500 до 1200 °C для изготовления керамики, в термолюминесценции «высвечиваются» те дефекты кристаллического строения, которые были «набраны» глиной за предшествующие геологические эпохи. После этого ионизирующее излучение радиоактивных примесей в керамике (несколько мил-

лионных долей урана и тория и несколько процентов калия) снова начинает «накапливать» дефекты, и «запасаемая» термолюминесценция со временем линейно нарастает от нуля. Тогда для определения возраста керамики нужно измерить: а) естественную термолюминесценцию L , «запасенную» к моменту измерения, б) чувствительность S керамики к ионизирующему излучению, т. е. возбужденный выход термолюминесценции на единицу ($рад$) дозы излучения ($1 рад = 10^{-2}$ дж поглощенной энергии излучения на 1 кг вещества), в) дозу излучения R в радах, полученную керамикой за год. После этого возраст керамики определяется из соотношения

$$\text{возраст (годы)} = L/SR.$$

Чтобы использовать эту обманчиво простую формулу и получить правильный абсолютный возраст, следует, однако, принять во внимание неоднородность керамического изделия. Обычно керамика представляет собой глиняную матрицу, в которую вкраплены включения минеральных зерен, размеры которых могут варьировать от менее чем 1 мкм до 1 мм. Было доказано, что основной выход термолюминесценции идет от этих минеральных включений, главным образом зерен кварца. Однако основной вклад в «запасаемую» термолюминесценцию вносят α -частицы от урана и тория, а эти примеси в основном находятся в глиняной матрице. Поскольку α -частицы имеют малый пробег в веществе (порядка 20—50 мкм), доза α -излучения, воспринятая вкраплениями минералов, весьма существенно зависит от размера их зерен, и поэтому при датировочных измерениях следует отбирать зерна, размеры которых заключены в заранее определенной области.

Техника эксперимента. До настоящего времени при датировочных измерениях использовались зерна двух классов. При «датировании по включениям» отбирались зерна минералов, размеры которых были заключены в пределах от 100 до 200 мкм. Для таких зерен вклад α -частиц в дозу облучения ничтожно мал, а основной вклад в годовую дозу вносят β -частицы от других радиоактивных примесей в керамике, γ -лучи от радиоактивных элементов в почве, окружающей керамику, и — в меньшей степени — космические лучи. Чувствительность зерен S к β -облучению измеряют при условии, что их чувствительность к γ -облучению одинакова для всех зерен.

При «датировании по тонкой фракции» с помощью осаждения из размельченной взмученной керамики отбираются глинистые и минеральные зерна размерами от 1 до 5 мкм. В зернах таких размеров α -частицы ослабляются в ничтожной степени, и теперь следует учитывать их вклад в годовую дозу облучения R . Чувствительность зерен к α - и β -облучению следует измерять порознь, поскольку некоторая α -доза, как правило, менее эффективно возбуждает термолюминесценцию, чем такая же β -доза.

Для измерения естественного выхода термолюминесценции L несколько миллиграммов отобранной навески нагревают до 500 °С на нихромовой

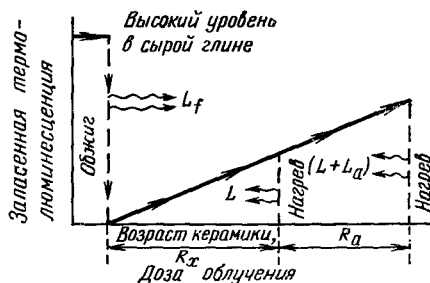


Рис. 5. Термолюминесцентная «история» образца глины.

L_f — термолюминесценция, испущенная при обжиге сырой глины; L — естественная термолюминесценция, приобретенная после обжига в результате облучения ($R рад/год$) от радиоактивных примесей в керамике; L_a — дополнительная термолюминесценция, испущенная после облучения известной дозой ($R_a рад$) от калиброванного источника. Чувствительность S керамики к ионизирующему излучению определяется как отношение L_a/R_a .

пластинке примерно 20 сек. Световой выход измеряется фотоумножителем и переносится координатным самописцем на график зависимости от температуры нагрева; получающийся график называется кривой высвечивания. Чувствительность к α - и β -излучению определяется путем экспонирования образца до получения им определенной дозы облучения от калиброванного дискового источника и последующим измерением его термолюминесценции. Две кривые высвечивания, полученные на типичном образце, воспроизведены на рис. 6. Видно, что и при температурах ниже 200 °C наблюдается очень слабая естественная термолюминесценция;

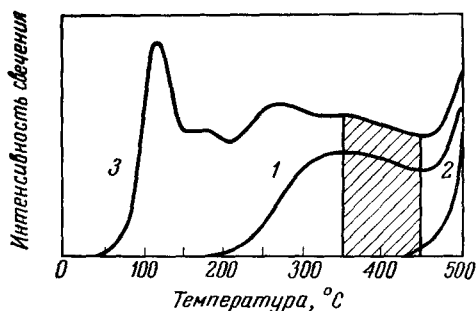


Рис. 6. Кривые высвечивания термолюминесценции для типичного керамического образца.

1 — естественная термолюминесценция (выход L); 2 — тепловое излучение абсолютно черного тела за вычетом термолюминесценции; 3 — термолюминесценция после облучения известной дозой β -излучения (выход $L + L_0$). Штрихованная область соответствует зоне температур, используемой для определения возраста. В этой области отношение $(L + L_0)/L = \text{const}$, что свидетельствует об отсутствии утечки частиц из ловушек, ответственных за термолюминесценцию.

эта низкотемпературная люминесценция обусловлена термостимулированной утечкой частиц из ловушек, существующей даже при комнатной температуре (т. е. 20 °C). Однако выяснилось, что те ловушки, которые обуславливают термолюминесценцию при температурах выше 350 °C, надежно удерживают плененные частицы в течение тысяч лет. По этой причине для определения возраста используются значения отношения L/S , измеренные при температурах 350—450 °C. Аккуратным измерениям термолюминесценции при температурах выше 475 °C мешает появляющееся заметное тепловое излучение. Нагрев образцов всегда производится в атмосфере азота для устранения «паразитной» термолюминесценции, не вызванной ионизирующим излучением. Если не принять эту предосторожность, то можно

спутать современную керамику с той, что была изготовлена 8000 лет назад: обе они могут давать одинаковую естественную термолюминесценцию.

Содержание урана и тория в керамике измеряется счетом α -частиц, калия — определяется химическим анализом. Исходя из этих данных, можно вычислить α - и β -дозу, составляющую обычно 0,1—2 рад/год. γ -доза от почвы, в которой обнаружена керамика, определяется путем погружения в эту почву на несколько недель капсулы с кристаллами фтористого кальция и последующим измерением их термолюминесценции.

Полученные результаты и ограничения метода. Проведение ряда контрольных испытаний, в которых использовались керамические образцы с возрастом, известным либо из радиоуглеродной датировки, либо по историческим свидетельствам, показало, что основы, на которых базируется термолюминесцентное датирование, достаточно надежны. Так, в частности, выяснилось, что можно не принимать всерьез во внимание таких мешающих эффектов, как выщелачивание урана из керамики и переход его в почву в течение некоторого времени после захоронения керамики, или нелинейный рост «запасаемой» термолюминесценции с увеличением дозы излучения.

Измерения Эйткина и др.¹⁴, в которых использовались 50 надежно датированных керамических черепков, показали, что термолюминесцентный возраст отдельного черепка обнаруживает стандартное отклонение (среднеквадратичную ошибку) от точного археологического возраста на $\pm 15\%$, а повторные измерения на том же черепке давали разброс даже

лишь 5%. Можно надеяться, что усовершенствование метода повысит его точность, однако вряд ли точность окончательного результата выйдет за пределы 5—10% из-за вариаций влажности керамики и окружающего ее слоя почвы. Дело в том, что вода частично поглощает ионизирующее излучение и тем самым снижает дозу облучения, полученную собственно керамикой. Сегодняшнюю влажность керамики и почвы легко измерить, однако для датирования нужны также сведения о сезонных и долговременных изменениях климата в течение периода погребения керамики, а получить такие сведения, да еще с достаточной точностью, чрезвычайно трудно.

Но даже при таких ограничениях точности метод термолюминесценции для датирования образцов должен оказаться необычайно ценным — и как дополнение к методу радиоуглеродного датирования, и как средство получения новых данных там, где известны расхождения между радиоуглеродным и точным календарным возрастом. В этой связи представляет значительный интерес недавнее исследование черепков из обожженной глины, найденных вместе с глиняными фигурками в раскопках стоянки палеолитического человека в Чехословакии. Измерения показали, что ловушки, ответственные за термолюминесценцию при температурах выше 425 °C, не были «опустошены» за время, прошедшее после обжига керамики. Определение возраста черепков этим методом дало примерно 30 000 лет, что согласуется с результатом 28 000 лет, полученным радиоуглеродным датированием.

При сравнении методов термолюминесцентного и радиоуглеродного датирования следует отметить важное достоинство первого из них, заключающееся в том, что датируемое событие (т. е. обжиг керамики) точно известно и имеет археологическую значимость. В противоположность этому, при датировании кусков дерева или древесного угля всегда существует возможность, что они были взяты из сердцевины дерева, т. е. старше того момента, когда древние люди что-либо с ними делали, на несколько сотен лет. Другое преимущество термолюминесцентного метода состоит в том, что керамика сама представляет непосредственный интерес для археологов, тогда как органический материал лишь сопутствует находкам, в том числе керамики, которые привлекают основное внимание археологии. Вместе с тем прочность черепков обуславливает их сравнительную распространенность в большинстве мест обитания древнего человека, тогда как подходящий для исследования органический материал часто не удается найти.

Наконец, следует отметить использование метода термолюминесцентного датирования для обнаружения археологических подделок. Многие образцы античной керамики и керамических статуэток имеют высокую художественную ценность и сопутствующую ей высокую стоимость на мировом рынке. Измерения термолюминесценции нескольких миллиграммов материала, соскобленного со второстепенных мест изделия, позволяют легко отличить настоящий антик от современной «копии», производство которых в ряде стран превратилось в процветающую промышленность.

4. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАХОДОК

Основу для восстановления археологами человеческой истории, особенно в доисторические эпохи, дает изучение уцелевших предметов, ибо доисторические общества определяются главным образом именно по тем предметам, которые они использовали. Разумеется, отправной точкой такого изучения является визуальное исследование находки. Так,

например, керамику классифицируют по форме сосудов и их раскраске. Одной из последних работ был детальный математический анализ этих типизирующих признаков керамики с помощью ЭВМ¹⁵. После того как информация, даваемая визуальным осмотром, исчерпана, в ход можно пустить физические методы изучения находки, которые позволяют получить дополнительную информацию. Эта информация может касаться двух основных вопросов: 1) материал, 2) технология изготовления. Получение ответа на первый вопрос в основном сводится к установлению вида сырья, использованного при изготовлении изделия и, в конечном счете, к определению источника этого сырья. Такой ответ нередко позволяет установить характер разделения труда в изучаемом обществе, а это в свою очередь многое говорит о его социальной и экономической организации. Вместе с тем определение способа изготовления керамики или металлических орудий позволяет выяснить технические возможности исследуемого общества.

М а т е р и а л. Из многих применяемых в археологии материаловедческих методов мы рассмотрим только три — минералогический, химический и изотопный анализы. Мы приведем также примеры использования этих методов при изучении каменных, керамических и металлических находок.

Минералогический анализ. Ходжиз¹⁶ исследовал с помощью минералогического микроскопа в плоскополяризованном свете тонкие (толщиной примерно 20 мкм) срезы с камней, обнаруженных в археологических образцах. Эти осколки камней либо встречаются в природной глине, либо добавляются в нее при приготовлении керамической смеси. Минералы в составе этих камней обычно прозрачны. Для их классификации используют такие характеристики, как типичная форма или скол кристалла, а также различные интерференционные эффекты, возникающие при прохождении света через кристалл и зависящие от того, является ли кристалл оптически однородным, одноосным или двуосным.

Некоторые камни имеют настолько характерные свойства, что можно совершенно точно установить их первоначальное происхождение. Классическим примером такого рода может служить доказательство того, что синие камни, раскопанные в Стоунхендже, были родом из гор Присциллы в Пемброкшире (Англия). Столь же важным оказалось установление источников сырья для каменных топоров и некоторых видов керамических изделий, относящихся к эпохам неолита и бронзового века.

К сожалению, керамика чаще всего содержит лишь включения кварца, тогда как кремни и обсидиан — вулканическое стекло, — как правило, встречаются только в каменных орудиях труда. Эти минералы встречаются повсеместно, а потому минералогический анализ не дает возможности установить их происхождение. Вместо этого метода приходится прибегать к химическому анализу — наиболее перспективному материаловедческому методу.

Химический анализ. При исследовании археологических находок наиболее подходят физические методы химического анализа, поскольку они экспрессны и не сопровождаются практически разрушением образцов. Для этой цели широко использовались описанные Эйткином² оптическая эмиссионная спектроскопия, рентгеновский флуоресцентный и нейтроноактивационный анализ. В каждом случае концентрации изучаемых элементов, присутствующих в малых или следовых количествах, определяют по регистрируемому от них характеристическому электромагнитному излучению, которое испускается этими элементами при возбуждении их атомных электронов или ядер.

Керамические находки можно рассортировать по группам на основе химического анализа на элементы, содержащиеся в них в малых количе-

ствах, и таким образом можно провести различие между глинами, пошедшими на их изготовление. Сравнивая состав этих глин с составом местных источников глины, можно в конце концов «привязать» находки к определенным залежам глины. При сравнении химического состава керамических образцов и выходов глины важно быть уверенным в том, что перед обжигом в глину не был занесен посторонний материал. По этой причине перед химическим анализом все же следует провести минералогический анализ образцов.

С помощью оптического эмиссионного спектрального анализа Кэтлинг и др.¹⁷ выполнили важное исследование минойской и микенской художественной керамики, датированной эпохой 1400—1200 гг. до н. э. При этом было проанализировано более тысячи керамических черепков, и в результате сопоставления концентраций девяти химических элементов удалось отличить минойскую керамику, изготовленную на о. Крит,

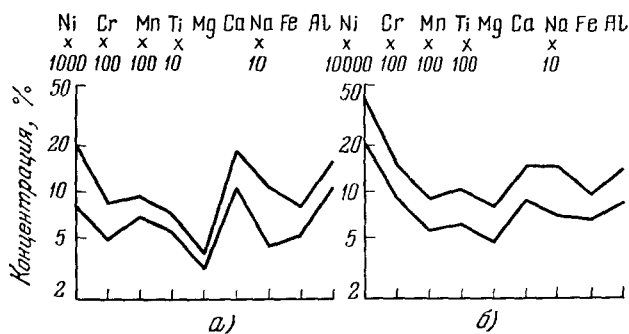


Рис. 7. Области концентраций девяти элементов (процентные содержания окислов), найденные: а) в микенской керамике (материковая Греция); б) в минойской керамике (о. Крит).

Оба вида керамики легко различить по содержанию Ni, Cr и Mg. Это обусловлено тем, что области концентраций названных элементов для обоих видов керамики не перекрываются.

от микенской керамики, изготовленной на материковой Греции. На рис. 7 приведены значения концентраций элементов по этим двум группам керамики. Они свидетельствуют о том, что вследствие неоднородности глины нужно проанализировать по меньшей мере десяток обломков, чтобы установить характерный состав керамики. Благодаря упомянутой работе удалось в средиземноморских поселениях отличить местную керамику от привозной с Крита и Микен — этих двух основных центров производства керамики, — несмотря на то, что местные и привозные изделия имели одинаковую форму и раскраску. В частности, выяснилось, что Микены, которые в ту пору вели интенсивную торговлю, вывозили свои керамические изделия как на Эгейские острова — Родос, Мелос и Хиос, — так и на Кипр, в Сирию и Египет.

Несколько легче исследовать обсидиановые находки с помощью химического анализа, поскольку вулканические источники обсидиана весьма немногочисленны. Ренфру и др.¹⁸, например, выяснили, что на Ближнем Востоке источники обсидиана имеются лишь в Турции. Они смогли определить положение источников, установив с помощью оптического эмиссионного спектрального анализа концентрации примесей бария и циркония в обсидиановых находках. Зная местоположение источников и находок, затем удалось выяснить тот путь, по которому обсидиан «путешествовал» примерно 7—10 тысяч лет назад: это был довольно длинный путь, он тянулся

примерно на 800 км к югу и приводил в такие города, как Иерихон и Харм. Существование таких торговых путей для обсидиана между удаленными друг от друга человеческими поселениями заставляет предположить возможность общения между ними в этот важнейший период «неолитической революции», когда человек впервые начал переходить к оседлой жизни, выращивая зерно и приручая животных.

В принципе возможно провести химический анализ и металлических находок и на его основе сгруппировать эти находки и определить происхождение руды, использовавшейся для их изготовления. При этом уже удалось получить интересные данные. Однако применение химического анализа здесь ограничивается тем обстоятельством, что на неоднородности концентрации анализируемых примесных элементов, присущие самому рудному месторождению, в готовом изделии накладываются еще неоднородности, зависящие от способа выплавки руды и от степени, в какой при выплавке использовался металлический лом, который мог иметь отношение к другим источникам руды.

В некоторых случаях анализ золотых и серебряных монет давал исключительно интересные сведения об уменьшении паритета (снижении содержания драгоценного металла) и тем самым свидетельствовал об экономических трудностях, переживаемых древними обществами. Например, проведенный Хоксом и др.¹⁹ анализ англо-саксонских монет VII века с помощью рентгеновского флуоресцентного спектрометра показал постепенную замену золотого содержания серебряным, что прежде всего связано с «золотым голодом», наступившим в Западной Европе из-за прекращения связей с Византией. Эта постепенная замена золота серебром совершалась путем семикратной девальвации, причем каждый раз содержание серебра увеличивалось на 14,3%, т. е. 1/7 по весу.

Изотопный анализ. С недавнего времени для определения относительного содержания различных изотопов, в особенности свинца, в археологических находках стала использоваться масс-спектрометрия. Известны четыре стабильных изотопа свинца, три из которых — Pb^{206} , Pb^{207} и Pb^{208} — являются конечными продуктами распада в естественных радиоактивных рядах, начинающихся с U^{238} , U^{235} и Th^{232} , а четвертый — Pb^{204} — не связан с каким-либо известным радиоактивным семейством. Относительная распространенность этих четырех изотопов сильно варьирует от месторождения к месторождению, завися, в частности, от возраста руды. Тем самым измерение относительного содержания этих изотопов в археологических образцах, имеющих в своем составе свинец, позволяет установить источник, из руды которого был выплавлен свинец. Этот метод пригоден для образцов не только из чистого свинца, но и из свинцовых сплавов (например, для бронзовых монет и орудий труда) и изделий, содержащих неметаллический свинец — в виде красок, глазури, стекол. Важной особенностью является то, что относительное изотопное содержание, в отличие от концентрации примесей, определяемой химическим анализом, не зависит от способа выплавки металла.

Технология изготовления. Ниже описаны некоторые примеры выбора физических методов исследования для определения технологии изготовления керамики²⁰ и металлических предметов²¹.

Керамика. Исследование тонких керамических слоев под минералогическим микроскопом позволяет получить ценные сведения о технологии смешивания, формовки и обжига глины. К примеру, если длинные минеральные включения ориентированы параллельно стенкам сосуда, то отсюда можно заключить, что изделие скорее всего вращали на гончарном круге, а не формовали вручную. Аналогично, наблюдая присутствие включений некоторых минералов, можно делать определенные заключе-

ния о температуре обжига; например, если присутствует кальцит, то это говорит о том, что обжиг велся при температуре не выше 750—850 °С, за которой кальцит разлагается.

Более точные данные о температуре обжига керамики можно получить из измерений теплового расширения. Этот метод основывается на том, что при обжиге глины происходит ее усадка в результате различных процессов спекания, например стеклования. Поэтому, когда образец керамики нагревается от комнатной температуры, он испытывает обратимое расширение (рис. 8), характеризующее его минералогический состав, и это расширение идет до тех пор, пока не достигается температура первоначального обжига. При дальнейшем повышении температуры начинается усадка образца, поскольку на обратимое расширение накладывается необратимое сужение, связанное с возобновлением спекания (т. е. нагрев керамики следует заводить за ту температуру, при которой производился когда-то ее обжиг). Температура, при которой впервые наблюдается «чистая» усадка, и указывает на ту, при которой первоначально обжигалась керамика.

Измерения, проведенные на большой группе керамических образцов²², показали, что используемые температуры обжига керамики составляли 500—1200 °С, причем ни верхнюю, ни нижнюю границу этого интервала не удается связать с какой-то определенной эпохой или областью земного шара. Например, обожженной при температуре 1200 °С оказалась как керамика бронзового века, найденная в Ираке (~3500 г. до н. э.), так и позднееримская керамика (~200 г. н. э.), а грубая древнеримская керамика обжигалась при 500—700 °С.

Металлические изделия. Методика исследования способов изготовления металлических изделий состоит в изучении в отраженном свете под металлографическим микроскопом полированной и протравленной поверхности шлифов, вырезанных из образцов. Такое изучение позволяет выявить внутреннюю кристаллическую структуру металла и тем самым дает сведения о методе литья и последующей обработки изделия. Так, для холодной обработки (например,ковки изделия) характерны удлинённые зерна и многочисленные полосы скольжения; если металл затем отжигался, то кристаллы уже не удлиняются, а двойникуются (т. е. соседние кристаллы вырастают зеркальными друг другу).

С помощью металлографического исследования серебряных головок на медных заклепках, украшающих бронзовый кинжал минойской культуры (о. Крит), Чарлз²³ смог установить, что эти два металла соединились благодаря образованию на границе их раздела медно-серебряного эвтектического сплава. То, что такая технология соединения металлов применялась еще примерно за 1400 лет до нашей эры, явилось удивительным открытием. До сих пор считалось, что разработка этой технологии принадлежит Болсоверу из Шеффилда, который изготовил «шеффилдскую

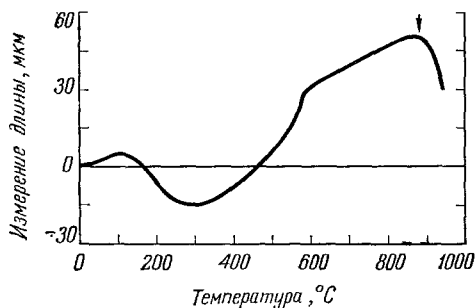


Рис. 8. Кривая термического расширения типичного керамического образца, показывающая изменения длины (в мкм) образца длиной 2,5 см.

Сужение образца в области 100—300 °С связано с потерей им воды, абсорбированной при пребывании образца в земле. Быстрое расширение примерно при 573 °С связано с переходом α -кварца в β -кварц. Стрелкой показана температура (880 °С), при которой впервые начинается «чистая» усадка, связанная с возобновлением спекания образца; эта температура и указывает температуру первоначального обжига образца.

пластину» только в 1743 г. Поскольку для образования медно-серебряной эвтектики без расплавления серебра требуется поддерживать температуру в пределах 780—960 °С, это свидетельствует о высоком техническом искусстве древних мастеров по металлу.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышесказанного становится очевидным, что методы современной науки оказывают все более существенную помощь археологии. Однако никогда не следует забывать, что эти методы — только оружие в руках археологов, позволяющее добывать больше фактов и помогающее как можно точнее восстанавливать прошлое человечества. При условии, что археологи готовы устанавливать истинность или ложность выдвигаемых ими теорий с помощью научных данных, представляются совершенно необоснованными страхи, недавно высказанные Жанеттой Хокс²⁴ о том, что естественные науки подобно чудовищу Франкенштейна захватывают в свои руки и обезчеловечивают археологию.

Археология — поле исследования, связывающее не только естественные и гуманитарные науки, но и сами научные дисциплины. Так, например, физик, изучающий античную керамику, вынужден обращаться к геологии, чтобы узнать происхождение сырья для нее, к технологии керамического производства, чтобы определить способ изготовления, и к почвоведению, чтобы выяснить возможное влияние почвы, в которой была погребена эта керамика.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. M. J. Aitken, *Physics and Archaeology*, N.Y., Interscience, 1961.
2. M. J. Aitken, *Contemp. Phys.* 3, 161, 334 (1962) (см. перевод: УФН 87, 303 (1965)).
3. *Science in Archaeology*, ed. by D. Brothwell and E. Higgs, L., 1963.
4. M. S. Tite, C. Mullins, *Archaeology* 12, 97 (1970).
5. C. Colani, *Archaeometry* 9, 3 (1966).
6. J. F. Eymden, G. H. Curtis, *Current Anthropology* 6, 343 (1965).
7. R. L. Fleischer et al., *Science* 148, 72 (1965).
8. W. F. Libby, *Radiocarbon Dating*, Chicago Univ. Press., 1955.
9. H. E. Suess, *J. Geophys. Res.* 70, 5937 (1965).
10. H. E. Suess, *Radioactive Dating and Methods of Low-level Counting*, Vienna, IAEA, 1967, p. 143.
11. V. Bucha, *Archaeometry* 10, 12 (1967).
12. F. Daniels et al., *Science* 117, 343 (1953).
13. *Thermoluminescence of Geological Materials*, ed. by D. J. McDougall, N.Y., Academic Press, 1968.
14. M. J. Aitken et al., *Nature* 219, 442 (1968).
15. F. R. Hodson, *World Archaeology* 1, 199 (1970).
16. H. Hodges, *Artifacts*, L., 1964.
17. H. W. Catling et al., *Ann. Brit. School Athens* 58, 94 (1963).
18. C. Renfrew et al., *Proc. Prehist. Soc.* 32, 30 (1966).
19. S. C. Hawkes et al., *Archaeometry* 9, 98 (1966).
20. A. O. Shepard, *Ceramics for the Archaeologist*, Washington, Carnegie Inst., 1968.
21. R. F. Tylecote, *Metallurgy in Archaeology*, 1962.
22. M. S. Tite, *Nature* 222, 81 (1969).
23. J. Charles, *Antiquity* 42, 278 (1968).
24. J. Hawkes, *ibid.*, p. 255.