

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

550.38

## ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ \*)

А. Кокс, Г. Дельримпл, Р. Доул

Когда расплавленные вулканические породы остывают и затвердевают, магнитные минералы, заключенные в этих породах, намагничиваются в направлении земного магнитного поля. Они сохраняют это намагничение и в дальнейшем и представляют собой, таким образом, постоянную магнитную запись (сильно напоминающую магнитную память элементов вычислительной машины) направления земного магнитного поля в том месте и в то время, когда происходило затвердевание лавы. В 1906 г. французский физик Бернар Брюне нашел вулканические породы, которые были намагничены в направлении, противоположном современному направлению магнитного поля Земли. Брюне пришел к заключению, что магнитное поле Земли должно было в прошлом изменить свой знак. Хотя наблюдения и выводы Брюне были подтверждены позже и другими исследователями, идея о перемене знака магнитного поля Земли привлекла мало внимания. Однако за последние несколько лет было определенно установлено, что магнитное поле Земли имеет два стабильных состояния: оно может быть направлено к Северному полюсу, как это имеет место в наши дни, или к Южному полюсу, причем оба эти направления несколько раз сменяли друг друга.

Нет никакой теоретической базы, на которой можно было бы ожидать объяснения таких свойств магнитного поля Земли. Более того, вся теория земного магнетизма находится в такой начальной стадии, что механизм изменения знака поля очень далек от понимания. Несмотря на это, магнитная память вулканических пород, а также наличие в них «атомных часов», начавших свой ход с момента намагничения пород, сделали возможным составить временную шкалу, на основании которой можно заключить, что за 3,6 миллиона лет магнитное поле Земли изменяло свой знак девять раз. Такая временная шкала дает нам в руки ценную методику для определения времени событий в истории Земли и может помочь исследователям решить вопрос о продолжительности дрейфа континентов.

Земное магнитное поле представляет собой поле аксиального магнитного диполя, которое, так сказать, эквивалентно внешнему полю гигантского магнитного стержня, расположенного в сердцевине Земли и направ-

\*) Allan Cox, G. Brent Dalrymple and Richard R. Doell, Reversals of the Earth Magnetic Field, Scientific American 215 (2), 44 (1967). Перевод Н. И. Гинзбург.

В оригинале имеется аннотация: «Некоторые вулканические породы намагничены в направлении, противоположном направлению магнитного поля Земли. Это происходит вследствие того, что магнитное поле Земли за последние 3,6 миллиона лет девять раз изменяло свое направление».

ленного примерно вдоль оси вращения планеты (или внешнему полю однородно намагниченной сферы или петли электрического тока, расположенной в плоскости экватора). Силовые линии такого поля направлены не к географическим полюсам, а к магнитным полюсам, и угол в какой-либо точке Земли между истинным Севером и направлением поля назы-

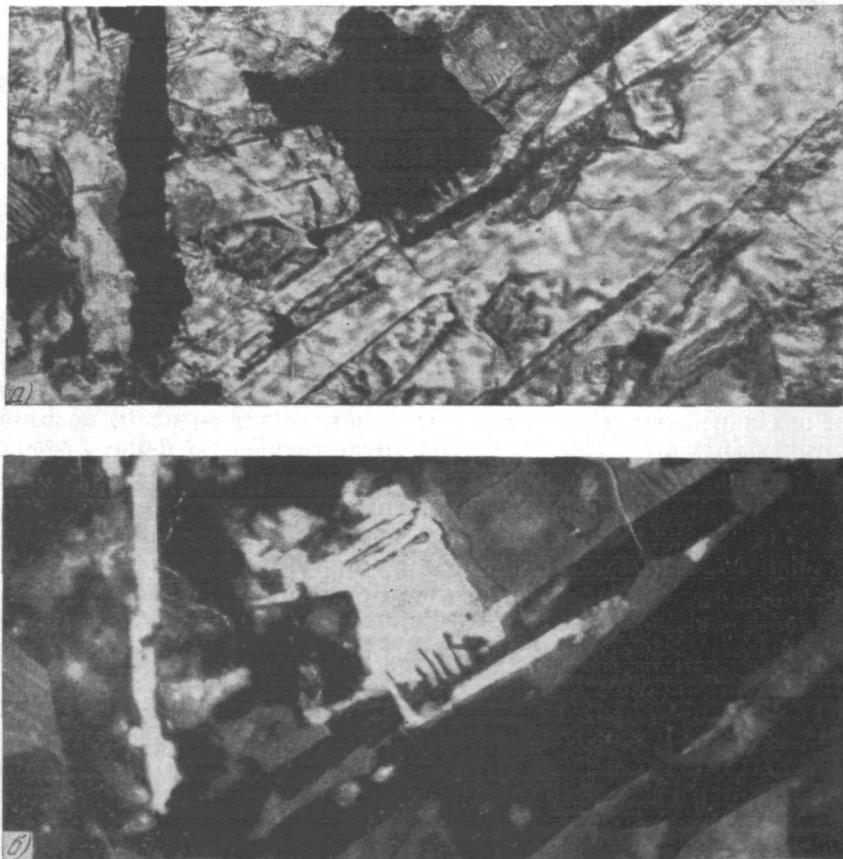


Рис. 1. Базальт с островов Прибылова.

Микрофотографии сделаны Норманом Прайме из Геологического управления США с одного из образцов, исследованных авторами. Магнитные минералы — сложные прорастания железа и окислов титана — непрозрачны и поэтому выглядят черными в проходящем свете (а) и очень светлыми в отраженном свете (б). Большие чистые минералы (светло-зеленые (а) и черные (б)) — полевые шпаты, содержащие радиоактивный изотоп калия, использованный для определения возраста образцов. Возраст этих пород 1,95 миллиона лет, их намагничение приблизительно параллельно направлению современного магнитного земного поля. Увеличено примерно в 600 раз.

вается углом магнитного склонения. Силовые линии, кроме линий на экваторе, направлены также к центру или от центра Земли, и угол между горизонталью и такой силовой линией называется углом магнитного наклона. Как раз вдоль этих земных магнитных силовых линий ориентируются магнитные поля элементов памяти в вулканических породах.

Сами элементы памяти представляют собой магнитные домены — крошечные тельца с однородным намагничением. Эти тельца состоят из различных железных и титановых окислов, которые можно легко обнаружить под микроскопом, поскольку, в отличие от большинства минералов изверженных пород, они не пропускают света и прекрасно отражают падающий свет (рис. 1).

При высоких температурах окислы железа и титана неоднородны. Они намагничиваются только после охлаждения до критической точки, называемой точкой Кюри, которая для обычных минералов вулканических пород зависит от их химического состава и лежит в пределах от 200° до 680° С.

Эти температуры значительно ниже температур кристаллизации вулканической лавы (около 1000° С), откуда ясно, что намагничение минералов происходит в результате физического вращения и ориентации в земном поле предварительно намагниченных зерен жидкой лавы, как это предполагалось ранее. Когда минералы охлаждаются и их температура проходит через точку Кюри, даже слабое земное поле напряженностью меньше одного гаусса способно их частично намагнитить. Это начальное намагничение является «мягким», подобно намагничению железа или обычной стали, которые легко намагничиваются в слабом магнитном поле. При дальнейшем понижении температуры в минералах происходит второй резкий скачок: начальное мягкое намагничение, приобретенное от земного магнитного поля, «замораживается» и становится «жестким», таким, каким является намагниченность искусственных постоянных магнитов.

Для геофизиков уместен вопрос о степени надежности работы этих элементов памяти при регистрации земного магнитного поля. Как точно регистрируют они направление поля? Наиболее точный способ оценить точность вулканических пород как регистрирующих устройств — измерить намагничение пород, изверженных и остывших недавно в тех местах,

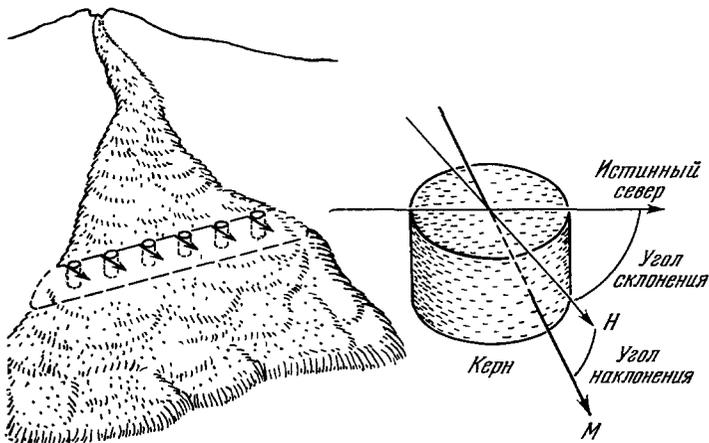


Рис. 2. Образцы для палеомагнитных исследований в виде кернов, высверленных из вулканических образований.

Направление намагничения (M) выражено как угол склонения между истинным Севером и горизонтальной проекцией (H) вектора M и наклоением M над или под горизонталью.

где известно направление земного магнитного поля. Мы провели такие измерения на трех излияниях лавы, происходивших на Гавайских островах в 1907, 1935 и 1955 гг.

Для получения образцов неповрежденных пород из затвердевших частей лавы используется полый цилиндрический алмазный бур. Из каждого излияния было взято от пяти до восьми «кернов», чтобы определить направление намагничения всего поля лавы, а не отдельных изолированных участков.

Прежде чем «керны» удалялись из бура, точно определялась их ориентация по отношению к горизонту и к истинному Северу. Затем

в лаборатории магнитный вектор образцов определялся на магнетометре. Результаты измерений трех лавообразований показали, что извержения лавы регистрируют земное магнитное поле с точностью в несколько градусов, что достаточно для большинства геофизических приложений (рис. 2—4).

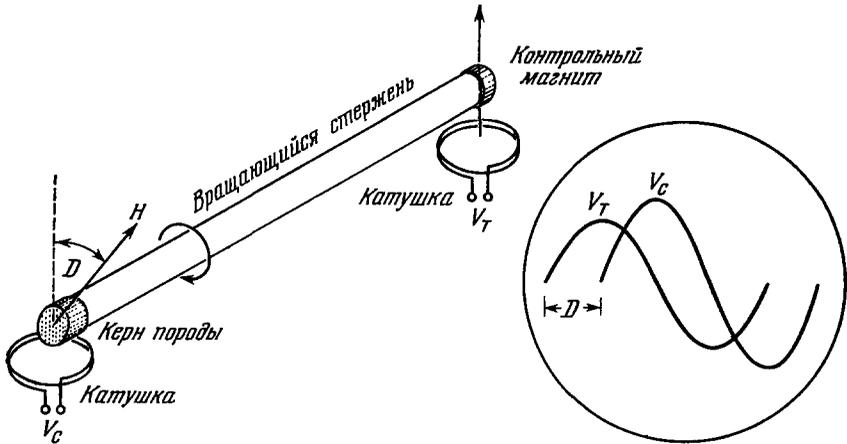


Рис. 3. Керн, смонтированный в магнетометре.

При вращении стержня электрические сигналы ( $V_C$  и  $V_T$ ) индуцируются керном в катушках и контролирующем магните и могут быть поданы на осциллограф. Напряженность и направление намагничивания керна определяются путем сравнения величины сигналов и их сдвига по фазе, который равен склонению ( $D$ ).

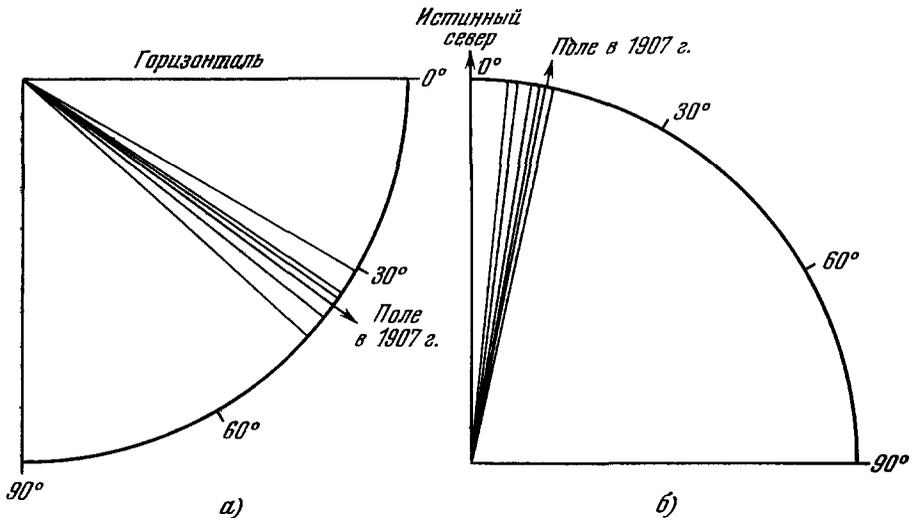


Рис. 4. Углы наклоения (а) и склонения (б) шести кернов из Гавайского излияния лавы 1907 г. группируются вокруг известных углов земного поля 1907 г.

Хотя величины углов, полученные из отдельных кернов, варьируют, средние их значения точно совпадают с историческим магнитным полем Земли.

Если намагниченные породы служат устройством, регистрирующим земное магнитное поле в древние времена, их магнитная запись должна быть стабильна. Каким является намагничение породы — «мягким», как у железа и обычной стали, или «жестким», как у постоянных магнитов? Вопрос стабильности является столь существенным, что лабораторные

исследования, проводящиеся в этом направлении, стали неотъемлемой частью палеомагнитных изысканий. Обычно для определения стабильности поля образец вулканической породы помещается в специальную «магнитную стиральную машину», где он находится в быстро меняющемся магнитном поле и где определяется приобретаемое им намагничение (рис. 5). Природная намагниченность большинства вулканических пород оказывается сравнимой по стабильности с намагниченностью самых жестких постоянных магнитов (рис. 6). После того как установлена магнитная жесткость породы данного извержения, дальнейшая промывка породы служит для удаления из образцов остатков «мягкого» намагничения, приобретенного после затвердения породы (возникшего, например, в результате вспышек молний). Оставшаяся в результате этого процесса жесткая намагниченность отражает направление первоначально окружавшего породу магнитного поля.

Из всего вышесказанного ясно, что палеомагнетизм достаточно точен и стабилен, чтобы снабдить нас информацией о прошедших состояниях земного магнитного поля. При обработке такой информации нужно, конечно, учитывать передвижение массивов вулканических пород, происходящее за геологические периоды; отклонение намагниченности образцов от направления современного земного магнитного поля может быть связано со складкообразованием, смещением пород в результате сдвигов или с постоянным дрейфом материков. Мы, однако, исследовали лишь относительно молодые породы и вулканические образования, намагниченность которых имеет ориентацию, возникшую в момент их затвердевания.

Мы начали палеомагнитные исследования на Гавайских островах, где провели испытания нашей методики. Великолепные потоки застывшей лавы, лежащие на склонах вулканов, снабдили нас магнитными записями, зафиксированными примерно полмиллиона лет тому назад. Мы собрали образцы от 107 потоков лавы и нашли, что угол их магнитного склонения составляет около  $10^\circ$  с направлением истинного Севера и располагается к востоку от него, а угол их магнитного наклонения лежит на  $30^\circ$  ниже горизонта (рис. 7). Примерно такую картину и можно было ожидать на основе дипольной природы земного магнитного поля.

Изучение других молодых вулканических пород, расположенных вдоль восточного пояса Тихоокеанского бассейна, дало аналогичные

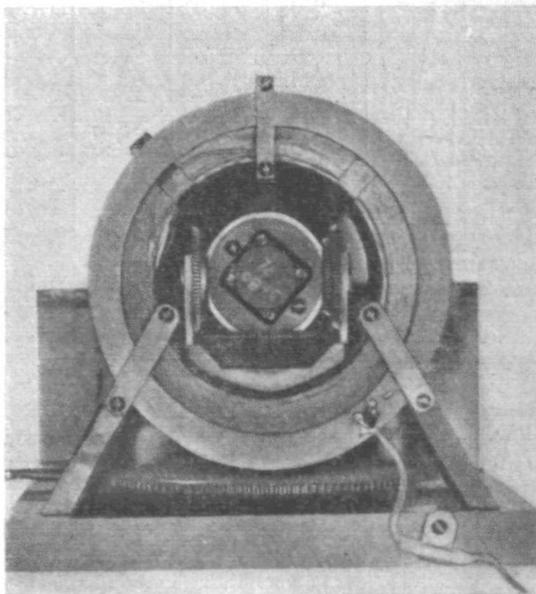


Рис. 5. «Магнитная стиральная машина», сконструированная авторами.

Образец, помещенный в камеру (центр), находится в переменном магнитном поле при вращении вокруг трех взаимно перпендикулярных осей. «Жесткое» намагничение образца остается неизменным, но «мягкая» компонента, направление которой неоднократно изменяется, разрушается при понижении переменного тока до нуля.

результаты. В высоких широтах островов Прибылова и в Беринговом море магнитные векторы вулканических пород резко отклонены вниз,

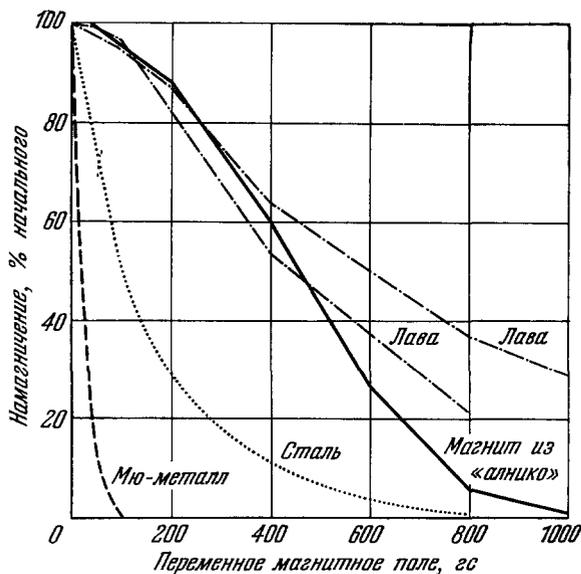


Рис. 6. «Жесткость» намагничения образца базальта, выраженная как количество намагничения, остающееся после «стирки» в переменных магнитных полях различной напряженности.

Стабильность намагничения пород значительно превышает стабильность намагничения сплава «мю-металла» или стали и сравнима со стабильностью намагничения сплава «аллико», из которого изготавливают постоянные магниты.

как этого и можно было ожидать для дипольного поля высоких широт. На Гавайских островах, на экваторе, магнитные векторы располагаются почти горизонтально. Измерения, проведенные во многих частях мира, указывают на то, что за период времени, когда происходило образование этих молодых потоков лавы (примерно полмиллиона лет), земное поле было дипольным и располагалось так же, как в наши дни.

Совершенно другие результаты были получены при палеомагнитных исследованиях более старых лавообразований. Только половина этих лавообразований намагничена в том же направлении, что и молодые вулканические породы; вторая половина намагничена в противо-

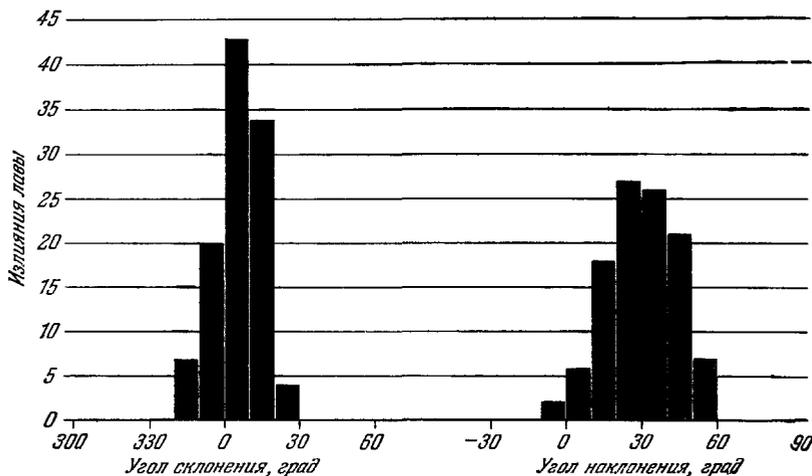


Рис. 7. Палеомагнитные результаты приведены для 107 вулканических образований на Гавайских островах.

Каждый угол, представленный на этих гистограммах, — средний угол для пяти или более кернов из одного излияния лавы. Данные группируются в среднем направлении Севера со средним углом наклона около 30° ниже горизонтали. Другими словами, углы примерно параллельны направлению современного магнитного поля Земли.

ложном направлении. Например, вулканические породы в средних широтах северного полушария намагничены в южном направлении

с отклонением кверху (рис. 8). За последние годы такой «антипараллельный» магнетизм был найден в тысячах образцов вулканических пород, добытых в различных уголках мира множеством независимо работавших исследователей. Особенно много образцов относится к периоду от 3,5 миллиона лет тому назад до настоящего

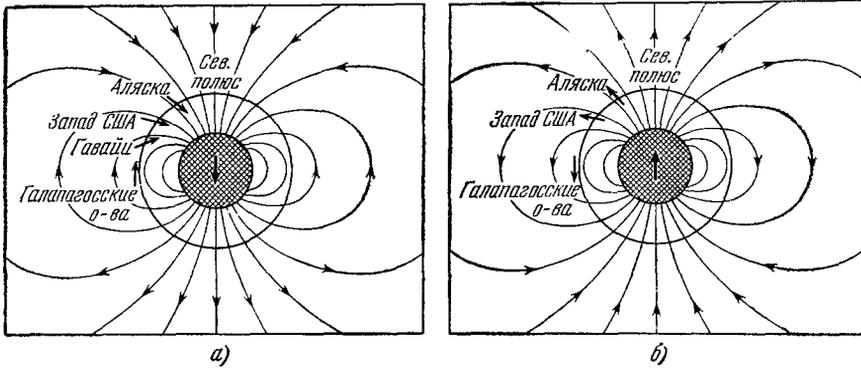


Рис. 8. Углы наклоения из излиний лавы с Аляски, Запада США (Калифорния, Айдахо и Нью-Мексико), Гавайских и Галапагосских островов обозначены жирными стрелками.

Возраст этих излиний достигает трех миллионов лет. Углы образуют две заметные группы: «нормальную» группу с намагничением, совпадающим с направлением современного магнитного земного поля (а), и «обратную» группу с противоположно направленным намагничением (б). Все излиния лавы с Гавайских островов имеют нормальное намагничение.

времени; полученные палеомагнитные результаты удивительно согласуются друг с другом. Магнитные векторы разбиваются на две группы: «нормальные» векторы, почти параллельные направлению современного земного поля, и «обратные» векторы, направленные приблизительно противоположно. Полученные векторы группируются в основном в тридцатиградусном угле вокруг этих двух направлений, только небольшое число векторов ориентировано в промежуточных направлениях (рис. 9).

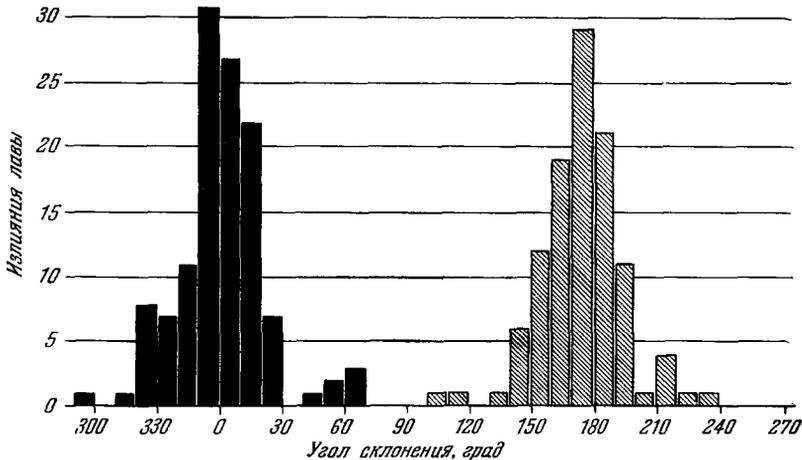


Рис. 9. Углы наклоения 229 излиний лавы с возрастом до трех миллионов лет с Аляски, Запада США, Гавайских и Галапагосских островов также образуют аналогичные две группы: северную («нормальную») и южную («обратную»).

Промежуточные направления наблюдаются редко.

Напрашивается немедленный вывод, что земное магнитное поле в прошлом изменило свой знак. Бруне именно так интерпретировал свои

результаты в 1906 г. во Франции, хотя он осторожно ограничил перемену знака земного поля только областью, где он собрал свои образцы. В 1929 г. Мотонори и Матуяма также нашли доказательства в пользу предположения о перемене знака земного магнитного поля, но они также ограничили свои выводы той областью Японии, откуда были взяты образцы. Скопившиеся доказательства, что измененное направление намагничения образцов неизменно противоположно направлению современного земного поля в месте нахождения этих образцов, привели со временем к гипотезе, что эта перемена знака носит не локальный характер, а глобальный, другими словами, что произошло изменение направления магнитного поля всей Земли.

Прежде чем принять окончательно гипотезу об изменении знака земного магнитного поля, необходимо было рассмотреть другое альтернативное предположение. Таким предположением является идея, что породы, намагниченные в противоположном направлении, могут обладать каким-либо специфическим минералогическим свойством, вызывающим такое именно намагничение в обычном нормальном поле. Наличие такого механизма «самоперемагничивания», или «самореверсирования», было предложено в 1950 г. Джоном Грэхемом, работавшим тогда в Институте Карнеги Вашингтонского департамента земного магнетизма, в качестве объяснения наличия «нормального» и «обратного» намагничения в образцах пород, сформировавшихся одновременно. Предположение Грэхема стимулировало французского физика Луи Нееля к исследованию этой проблемы с точки зрения физики твердого тела. Вскоре Неель обнаружил несколько возможностей возникновения самоперемагничивания. Экспериментальное подтверждение последовало немедленно. В исследовательской лаборатории Филлипса в Голландии Э. Гортер синтезировал железо-хром-марганцевое соединение, в котором происходило самоперемагничивание. С. Уйеда и Т. Нагата из Токийского университета нашли самоперемагничивающиеся вулканические породы.

Стало, таким образом, очевидным, что по крайней мере некоторые вулканические породы не являются надежными магнитными записями. Подобно магнитной ленте, пущенной в обратном направлении, они иногда регистрируют сигнал, который не только ошибочен, но отличается от правильного точно на  $180^\circ$ . Если бы все обратное намагничение можно было объяснить за счет самоперемагничивания, то исчезло бы экспериментальное доказательство того, что магнитное поле Земли может изменять свой знак. Напрашивается следующий очевидный эксперимент: нужно нагреть образцы вулканических пород, затем охладить их в известном поле и измерить приобретенное ими намагничение. Такие эксперименты были проведены на многих сотнях образцов с обратным намагничением, и только несколько из них (меньше одного процента) обладали свойством самореверсирования поля.

Таким образом, лабораторный анализ согласуется с гипотезой о перемене знака земного магнитного поля. Однако, подобно многим процессам образования пород, процесс натурального намагничения не может быть воспроизведен в лабораторных условиях с достаточной полнотой. Отсутствующей составляющей этого процесса является время, а для определенных теоретических процессов самореверсирования фактор времени является критическим. Например, Джон Верхуген из Калифорнийского университета в Беркли показал теоретически, что определенные окислы железа, содержащие примеси алюминия, магния или титана, намагничивающиеся нормально при быстром охлаждении в нормальном магнитном поле, могут изменить направление намагничения, когда в охлажденном окисле

происходит упорядочение атомов к равновесному распределению. Вычисленное время, потребное для такого самореверсирования, — порядка 100 000—1 000 000 лет, что трудно воспроизвести в лабораторных условиях. Теоретические исследования Нееля и Верхугена показали, что из факта редкого получения самореверсирования в лабораторных условиях нельзя с достоверностью заключить, что оно столь же редко происходит в природе.

Как же тогда можно установить геофизическую сущность обратного магнетизма? За последнее десятилетие экспериментальные исследования развивались в двух направлениях, следующих за двумя предложенными гипотезами. Одно из направлений — попытка найти корреляцию между намагничением пород и их минералогическим составом. Процессы самореверсирования не всегда могут быть воспроизведены в лабораторных условиях, но, если все обратное намагничение связано с процессами, происходящими на минералогическом уровне, породы с обратным намагничением должны чем-то отличаться от аналогичных пород с нормальным намагничением. Поскольку по всему миру происходили и происходят одни и те же химические процессы, уникальные минералогические свойства, связанные с обратным намагничением, должны проявляться в породах во всех частях земного шара.

Такой подход был наиболее активно осуществлен П. Блэкеттом в Империял колледже в Лондоне и Родни Вильсоном в Университете Ливерпула. В некоторых сериях пород Вильсон обнаружил корреляцию между обратным намагничением и минералогическими свойствами, в других же породах такая корреляция не была обнаружена. Подобно Вильсону, мы время от времени замечали корреляцию между минералогическим составом и намагничением для серий образцов из одной и той же местности, но эта корреляция могла возникать из пульсирующего характера вулканических извержений. Между двумя последовательными извержениями, разделенными длительным промежутком времени, минералогический состав лавы обычно меняется. Если полярность земного поля также изменилась за этот период, то возникнет явная корреляция между минералогическим составом и полярностью. Коротче говоря, минералогические исследования пока еще не дали доказательств, что все или хотя бы большая часть обратного намагничения возникла в результате самореверсирования.

Второе экспериментальное направление возникло в связи с теорией изменения направления поля Земли. Если земное магнитное поле меняет свое направление от нормального к обратному за некоторый промежуток времени, то геологический возраст пород с обратным намагничением должен также разбиться на соответствующие интервалы. Данные о возрасте и намагничении пород должны ответить на вопрос о справедливости теории изменения полярности земного поля и, если эта теория справедлива, дать временную шкалу перемагничивания. Матуяма отметил в 1929 г., что геологический возраст всех пород с обратным намагничением в Японии — ранний плейстоцен (около миллиона лет назад), в то время как более молодые породы имеют нормальное намагничение. Возможно, наиболее сильным доказательством в поддержку теории изменения знака земного поля было бы доказательство по способу Матуямы, что намагничение пород во всех частях мира, независимо от их состава, зависит от времени.

Трудность на этом пути лежит в нахождении достаточно точного метода установления возрастной связи пород с «нормальным» и «обратным» намагничением. Многие способы установления точных возрастных связей

старых пород основаны на изучении окаменелых ископаемых растений и животных. Эти способы неприменимы для последних миллионов лет в связи с малой скоростью эволюции и со временем, потребным для миграции растений и животных. Естественным решением могли явиться какие-либо радиоактивные часы, и наши исследования быстро ограничились калиево-аргоновыми часами, впервые предложенными в 1940 г. Р. Ивэнсом из Массачусетского технологического института и широко применяемыми теперь в геологических исследованиях (рис. 10). Калий-40 является радиоактивным изотопом, всегда содержащимся в количестве 0,12% в обычном калии. Этот изотоп входит в состав химических соединений большинства

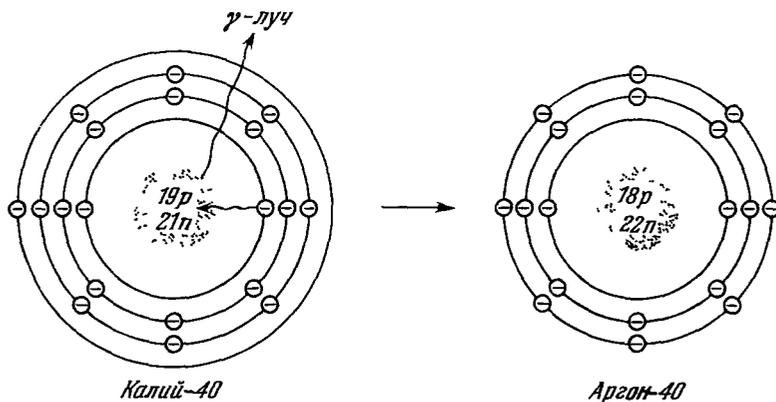


Рис. 10. Калиево-аргоновые часы, с помощью которых определяется возраст переполюсовок земного магнитного поля.

Часы основаны на распаде калия-40 с образованием аргона-40. При распаде атомный электрон, захваченный ядром калия, превращает протон в нейтрон с испусканием  $\gamma$ -луча.

минералов вулканических пород. Он распадается с известной и постоянной скоростью и переходит в аргон — газ, не образующий никаких известных соединений.

Аргон сохраняется внутри кристаллической структуры минералов и, если минералы не нагреваются или не претерпевают каких-либо изменений, накапливается в них. Количество накопившегося аргона является функцией количества калия и продолжительности времени с начала процесса его распада. Следовательно, измеряя количество калия-40 и аргона-40 в породах, можно вычислить их возраст. Аргон не сохраняется, пока породы находятся в жидком состоянии, следовательно, для вулканических пород калиево-аргоновые часы начинают свой ход только после затвердевания лавы.

Количество калия-40 в образце определяется обычно с помощью измерения обычными химическими методами количества всего калия, из которого вычисляется содержание калия-40 по известному процентному соотношению. Определить количество аргона труднее, поскольку он содержится в образцах в очень малых количествах. Типичный 10-граммовый образец базальта с возрастом в миллион лет содержит  $10^{-9}$  грамма аргона-40, выделившегося из калия-40, и точность полученных данных зависит от точности измерения количества этого аргона. Образец породы или минерал помещается в обезгаживающее устройство и плавится для того, чтобы содержащийся в нем аргон-40 мог выделиться. Из образца удаляются вода и такие газы, как кислород и азот. Во время обезгаживания к газу, выделившемуся из образца, добавляется известное количество обогащенного изотопами аргона. В результате получается газообразный

аргон, состоящий из трех компонент: аргона-40, количество которого нужно определить, обогащенного газа, состоящего в основном из аргона-38 с примесью аргона-36 и аргона-40, и загрязняющего аргона из атмосферы, для которого необходимо вводить поправки. Эта аргоновая смесь анализируется с помощью масс-спектрографа, который дает относительное содержание всех трех изотопов аргона. Зная количество и относительный изотопический состав обогащенного газа, состав атмосферного аргона и общей газовой смеси, можно определить количество аргона, образовавшегося из калия-40. Полученные результаты вместе с результатами анализа по содержанию калия используются для определения возраста вулканических пород.

Для исследования вопроса о перемене знака магнитного поля Земли калиево-аргоновый метод имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими методами определения возраста пород. Его можно широко применять для самых различных вулканических пород. Этот метод является также единственным, который можно использовать в широком интервале от нескольких тысяч до нескольких миллионов лет. И, наконец, как мы уже отмечали, калиево-аргоновые часы начинают свой ход точно в тот самый момент, когда в вулканической породе «замораживается» магнитная запись.

Калиево-аргоновый временной метод успешно применялся при изучении около 100 намагниченных вулканических образований с возрастом от настоящего времени до 3,6 миллиона лет (рис. 11). Эта работа была выполнена первоначально нами в геологической лаборатории в Калифорнии и Я. Мак-Дугаллом, Д. Тарлингом и Ф. Чамалауном в Австралийском национальном университете. Дополнительные данные были получены М. Руттенем в Утрехтском университете и С. Громмэ, Р. Хайем, Д. Эверденом и Г. Куртисом в Калифорнийском университете в Беркли. Исследованные вулканические породы различного типа были взяты из различных частей мира, так что информация была получена из разнородных (гетерогенных) источников.

Как можно видеть из рис. 11, возрасты пород с «нормальным» и «обратным» намагничением располагаются чередующимися группами, что сводит к минимуму сомнения в реальности переполюсовок магнитного поля Земли. Чтобы объяснить такое расположение самореверсом, потребовалось бы ввести малоразумные совпадения, связанные с синхронными мировыми изменениями в природе процессов образования и намагничения минералов.

Для последних 3,6 миллиона лет палеомагнитными методами и с помощью радиоактивных часов были обнаружены четыре главные «нормальные» и «обратные» чередующиеся группы. Мы назвали эти основные группы эпохами геомагнитной полярности и присвоили им имена исследователей, внесших основной вклад в наши знания о земном магнитном поле. На эпохи полярности наложены короткие флуктуации магнитной полярности, продолжительность которых меньше самой эпохи на порядок величины. Мы назовем эти короткие периоды переполюсовки по названиям тех местностей, где они были обнаружены.

Периоды переполюсовок важны для теоретического изучения земного магнетизма, поскольку они подчеркивают нерегулярный характер изменений знака земного поля. Первая переполюсовка с коротким периодом, названная олдувайским «нормальным» периодом, была обнаружена в Олдувайском ущелье (Olduvai Gorge) в Танзании в 1936 г. Громмэ и Хайем. Сначала полагали, что олдувайское излияние относится к полярной нормальной эпохе Гаусса. Поэтому оно не рассматривалось как

аномальное. Когда же были применены лучшие методы определения возраста пород, олдувайское извержение, попав в обратную эпоху Матуямы, стало аномальным явлением в общей согласующейся картине полярных эпох.

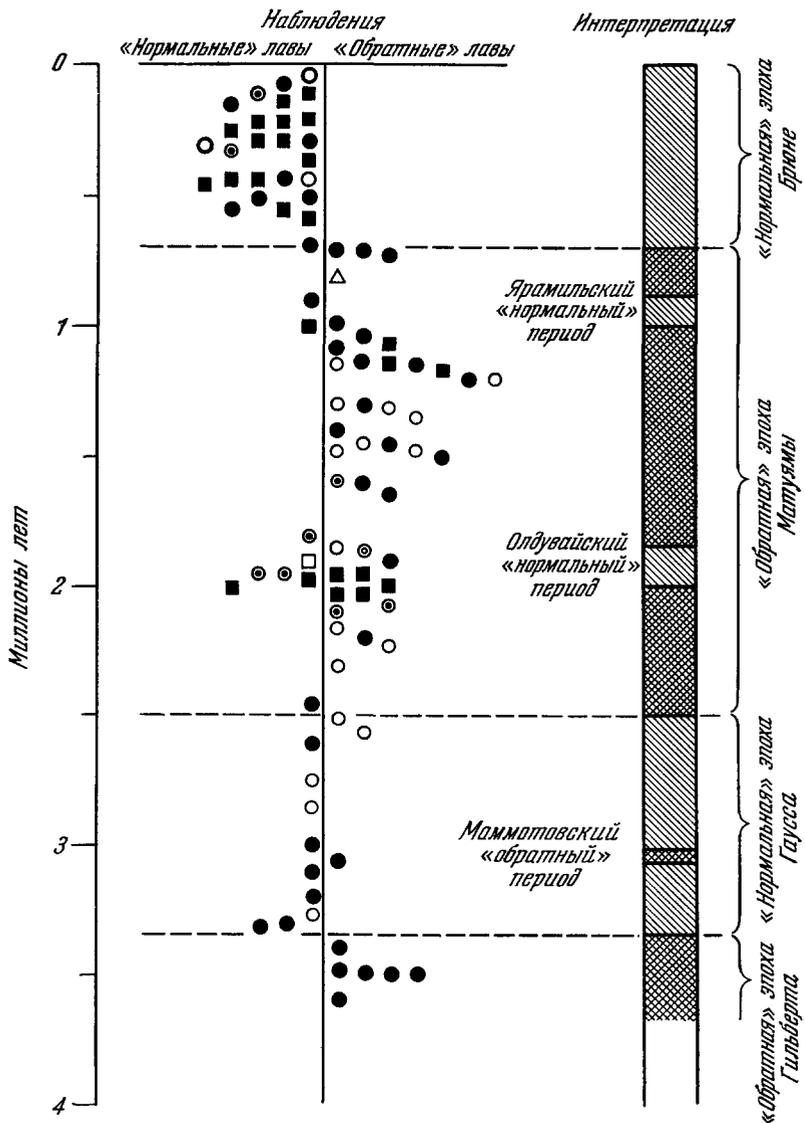


Рис. 11. Временная шкала для переполюсовок земного магнитного поля, построенная на основе палеомагнитных и радиометрических данных, полученных примерно для 100 вулканических образований в обоих полушариях.

Лавы с «нормальным» и «обратным» намагничением нанесены согласно с их возрастом (левая часть рисунка). Ясно видно, что все точки образуют четыре основные временные группы, или геомагнитные полярные «эпохи», в течение которых поле Земли сохраняло полностью или преимущественно один знак. На эпохи накладываются короткие периоды переполюсовок. Образец, изображенный на рис. 1, послужил источником для части данных, попавших в олдувайский период. ● — Запад США; ○ — Гавайские острова; ⊙ — острова Прибылова; темные кольца (вверху слева) — Галапагосские острова; ■ — остров Реуньон; □ — Африка; △ — Европа.

После обнаружения аналогичной аномалии на островах Прибылова нами было высказано предположение о коротких флуктуациях полярности земного магнитного поля. На островах Прибылова были обнаружены

три «нормально» намагниченных излияния лавы, имеющих тот же возраст, что и олдувайское излияние, — порядка 1,9 миллиона лет. Слои этих излияний лавы были заключены между двумя слоями с «обратным» намагничением, возраст которых был немного меньше и немного больше средних слоев, что подтверждало точку зрения о существовании кратких периодов перемагничивания земного поля. С тех пор обнаружено еще два аналогичных периода: период переполюсовки с «обратной» полярностью, зафиксированной 3 050 000 лет назад в Маммоте, Калифорния, и период с «нормальной» полярностью, зафиксированной 900 000 лет назад в вулканических породах около Ярамильской бухты (Jaramillo Creek) в Нью-Мексико. Ярамильский период был недавно подтвержден Чамалауном и Мак-Дугаллом при изучении ими излияний лавы на острове Реуньон в Индийском океане, где они обнаружили также два излияния, относящихся к олдувайскому периоду.

Очень редко можно обнаружить слои излияния лавы с магнитными записями самого полярного перехода. Этот факт указывает на то, что время, требуемое для полного изменения знака магнитного поля Земли, удивительно мало: по лучшим нашим оценкам, время такого перехода составляет 5000 лет. Наша оценка базируется на отношении между числом излияний лавы, в которых зафиксировано земное магнитное поле в период его переполюсовки, и числом излияний лавы с четко выраженной «нормальной» или «обратной» полярностью. Такая косвенная оценка необходима, поскольку калиево-аргоновый метод определения возраста пород непригоден для разрешения столь малого возрастного различия, как 5000 лет. На шкале геологического времени полярные переходы выглядят почти мгновенными и поэтому могут служить острыми временными отметками.

Идея о перемене знака земного магнитного поля выглядела сначала столь нелепой, что немедленно возникло подозрение о нарушении основных законов физики. Большинство исследователей, работающих в этой области, иногда задумывались над вопросом о совместимости такой идеи с физической теорией магнетизма. Этот вопрос имеет смысл только в контексте с более широким вопросом: почему у Земли имеется магнитное поле? Геофизики не дают уверенного ответа на этот вопрос. После длительных исследований вопрос о земном магнитном поле остается наиболее хорошо описанным и наименее всего понятным явлением из всех планетарных явлений. Единственный механизм, который был предложен в качестве основы приемлемой теории земного магнетизма, — механизм магнито-гидродинамического динамо. Согласно этой теории, которая первоначально была развита В. Эльзассером, работающим теперь в Принстонском университете, и сэром Э. Буллардом из Кембриджского университета, расплавленное железо-никелевое ядро земли аналогично электрическим проводникам динамо-машины. Конвекционные токи в ядре обеспечивают необходимое движение, и результирующие электротокки создают магнитное поле. Весь этот регенерирующий процесс первоначально начался или со случайного магнитного поля, имевшегося в период формирования Земли, или с небольших электротоков, возникших по таким же причинам, как ток в электробатарее (см. <sup>1</sup>).

Математические трудности этой теории огромны. Невозможно предсказать, какова должна быть интенсивность магнитного поля Земли и является ли это поле стационарным или флуктуирует. Теория находится, конечно, еще в зачаточном состоянии, чтобы на ее основании можно было предсказать, могут ли вообще происходить перемены знака земного поля, а если могут, то при каких условиях. С другой стороны, были получены полные математические решения для простой теоретической модели

динамо-машины, и эта модель обнаруживает спонтанные переполюсовки магнитного поля; некоторые модели дают ряд последовательных переполюсовок, которые удивительно похожи на временную шкалу геомагнитной полярности. Эти результаты демонстрируют по крайней мере, что магнитные переполюсовки возможны в самогенерирующих динамо-машинах. По существу же наблюдения являются ведущей теорией в этой области исследований, и любая полная теория земного магнетизма должна в конце концов включить наблюдаемые переполюсовки магнитного поля Земли.

Тем временем геологи используют временную шкалу переполюсовок земного магнитного поля для установления возрастных соотношений между породами, для которых трудно это сделать каким-либо другим

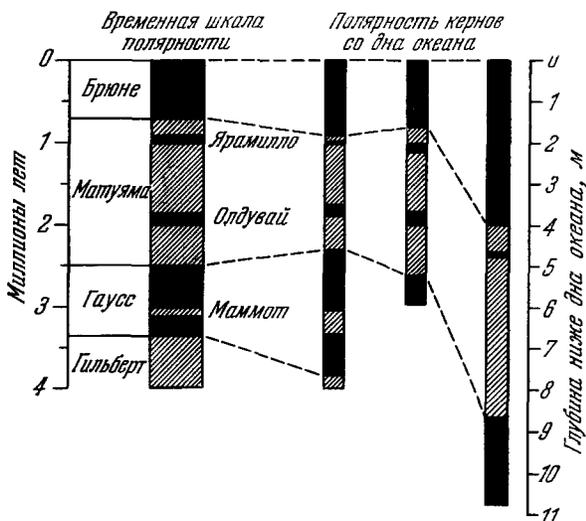


Рис. 12. Глубинные морские отложения, подтверждающие временную шкалу переполюсовок земного поля.

Магнитные частицы ориентируются в направлении магнитного поля Земли в процессе опускания на дно. Керна, содержащие многослойные отложения, могут зафиксировать ряды «нормальных» (одинарная штриховка) и «обратных» (двойная штриховка) эпох и периодов переполюсовок. Приведенные на рисунке керны данных отложений Антарктики коррелируют с временной шкалой.

магнитную запись, относящуюся к полярной эпохе Гильберта (3,6 миллиона лет до нашего времени), в которой картина переполюсовок необыкновенно похожа на картину нашей временной шкалы полярности. Даже короткие периоды переполюсовки заметны в явном виде. Эти находки служат подтверждением временной шкалы переполюсовок, построенной при изучении вулканических пород, и на этом основании можно предположить, что изучение полярности может снабдить нас методом определения скорости накопления морских осадочных отложений и установления всемирных корреляций среди различных глубоководных морских отложений, т. е. поможет решить проблему, долго занимавшую умы океанографов.

Магнитные исследования помогают также при установлении стратиграфических связей между морскими и континентальными породами. Магнитная стратиграфия, связанная с изучением переполюсовок, показала, например, что отложения ледникового происхождения в Исландии и на дне моря Беллинсгаузена накопились примерно в одно и то же время,

особенно важное приложение этой шкалы — определение возраста глубинных морских осадков, для которых данные существуют только в коротком промежутке до 200 000 лет. Долго полагали, что мелкозернистые осадочные отложения могут намагничиваться земным магнитным полем, когда они медленно опускаются в спокойной воде. Недавно С. Гаррисон и Б. Фуннель из Scrippsского института океанографии и Н. Опдайк, Д. Хайес и их сотрудники из Ламонтской геологической обсерватории Колумбийского университета наблюдали магнитные переполюсовки в кернах глубинных морских отложений (рис. 12). В одном из кернов (из моря Беллинсгаузена около Антарктики) Опдайк и Хайес нашли

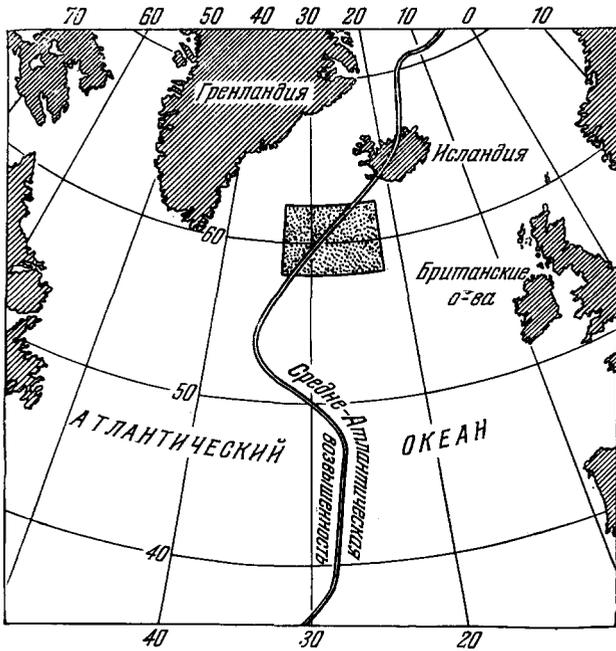


Рис. 13. Магнитные аномалии, обнаруженные на дне океанов, особенно вдоль среднеокеанских возвышенностей. На карту нанесена площадь аномалии (точки) около Средне-Атлантического гребня.

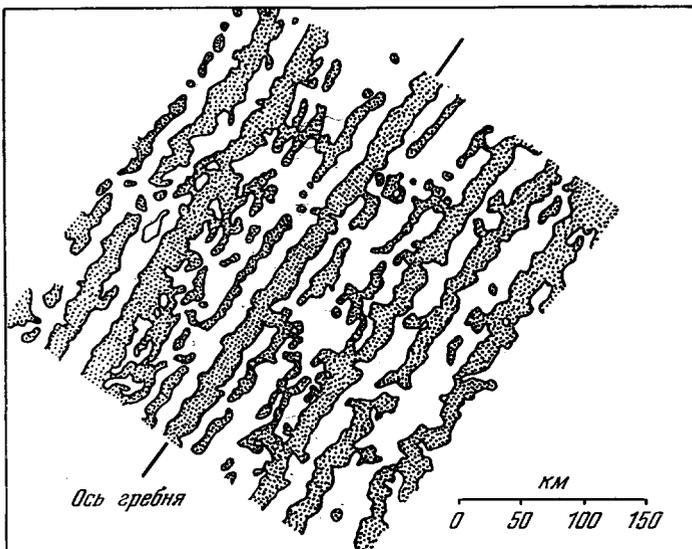


Рис. 14. Аномалии на площади, обозначенной на карте (см. рис. 13), располагаются удивительно симметрично.

Параллельные слои, в которых магнитное поле сильнее (точки) или слабее (светлый) среднего земного магнитного поля для данной области, ориентированы вдоль оси гребня. Магнитные слои были образованы слоями пород с «нормальным» и «обратным» намагничиванием.

в конце эпохи Гаусса с нормальной полярностью, т. е. примерно 2,5 миллиона лет тому назад. Этот факт чрезвычайно важен для изучающих геологию плейстоценовой эпохи.

Переполюсовки могут объяснить некоторые загадочные магнитные аномалии многих участков на дне океанов, особенно тех, которые примыкают к среднеокеанским возвышенностям или гребням (см. <sup>2</sup>). Эти аномалии располагаются прямолинейными полосами, простирающимися на сотни и даже тысячи миль, в которых напряженность земного магнитного поля ниже или выше средней напряженности поля для данной области. Легко видеть, что присутствие в земной коре образований с «нормальным»

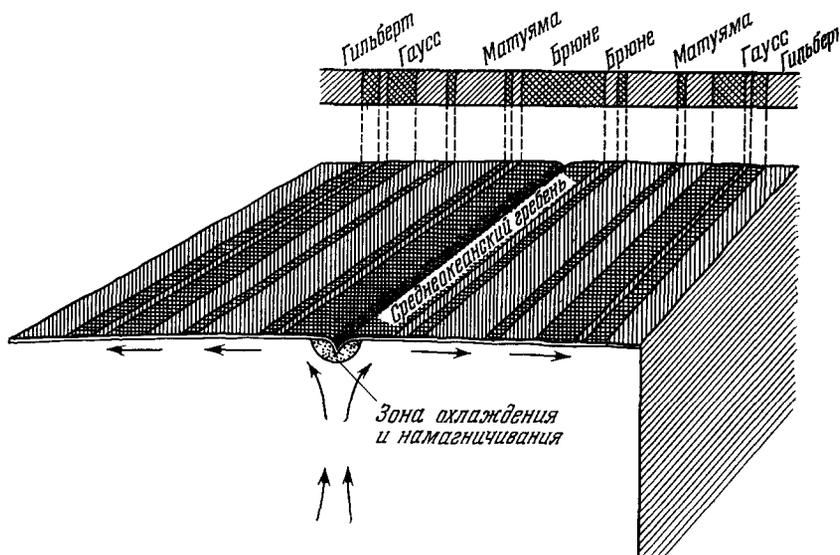


Рис. 15. Растяжение дна океана может объяснить симметрию магнитных аномалий.

Согласно теории (см. текст), конвекционные токи приводят к поднятию расплавленного вещества под среднеокеанской возвышенностью, где оно застывает, намагничивается и затем раздвигается постепенно от гребня. Симметричные слои «нормального» и «обратного» намагниченных пород могут возникать в результате комбинированного эффекта раздвижения и переполюсовки земного магнитного поля.

и «обратным» намагничением, которое либо складывается, либо вычитается из дипольного поля Земли, может объяснить такие аномалии. Однако многие магнитные аномалии обнаруживают удивительно симметричное расположение вокруг гребней некоторых среднеокеанских возвышенностей (рис. 13 и 14), которое трудно объяснить на базе известных вулканических процессов.

Недавно Ф. Вине, работающий теперь в Принстонском университете, и Дж. Мэтьюз из Кембриджского университета показали, что идеи, выдвинутые Г. Хейсом из Принстона и канадским геофизиком Дж. Тузо Вильсоном для объяснения некоторых характеристик океанского бассейна и его берегов, а также дрейфа континентов, могут пролить свет и на симметрию аномалий. Хейс и Вильсон предположили, что конвекционные токи в земной мантии, расположенной под земной корой, могут привести к поднятию коры с образованием среднеокеанской возвышенности, а затем вызвать движение пород в стороны от гребня (см. <sup>3</sup>). Если при удачном стечении обстоятельств слои застывают и намагничиваются при нужной полярной эпохе, то, как считают Вайк и Мэтьюз, симметрия намагничивания может быть объяснена гипотезой Хейса и Вильсона. Аналогичным образом на основании расположения слоев пород вдоль Средне-Атлантиче-

ского гребня можно предположить, например, что морское ложе движется в стороны от гребня со скоростью около одного сантиметра в год (рис. 15). Эта скорость согласуется с более ранними оценками Вильсона. Хотя гипотеза о движении морского дна кажется несовместимой с некоторыми данными и не принимается многими океанографами и геологами, магнитные исследования свидетельствуют, по-видимому, в ее пользу.

Переполюсовки земного магнитного поля можно использовать даже для понимания истории жизни на нашей планете. В 1963 г. Р. Уффен из Университета Западного Онтарио заметил, что, если магнитное поле Земли во время изменения знака проходит через нуль или сильно уменьшается, Земля должна терять свои магнитные экранирующие свойства против космических лучей. В результате должен увеличиваться уровень радиации и должна повышаться скорость мутаций. Палеомагнитные данные о свойствах земного поля в период переполюсовок обрывочны, но имеются указания на то, что напряженность магнитного поля при перемене его знака может понижаться в пять раз по сравнению с обычным ее значением. На основании палеонтологических данных Уффен приходит к предположению, что скорость эволюции необычно возрастала, когда земное магнитное поле неоднократно меняло свой знак, хотя поддержка такого предположения на основе существующих палеомагнитных сведений очень слаба.

Керны, исследованные Опдайком и Хейсом, свидетельствуют немного в пользу теории Уффена. Из этих исследований можно заключить, что основные изменения семейств микрофауны происходят примерно во времена двух переполюсовок земного поля.

Однако необходимо еще много информации, прежде чем станет возможно судить о том, до какой степени переполюсовки земного магнитного поля влияли на жизнь нашей планеты.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Walter M. El s a s s e r, Scientific American, May 1958.
  2. Arthur D. R a f f, Scientific American, October 1961.
  3. J. Tuzo W i l s o n, Scientific American, April 1963.
- См. также: E. I. H a m i l t o n and L. H. A h r e n s, Applied Geochronology, Academic Press, 1965.
- Tsuneji R i k i t a k e, Electromagnetism and the Earth's Interior, American Elsevier Publ. Co., 1965.
- E. I r v i n g, Paleomagnetism and Its Application to Geological and Geophysical Problems, Wiley and Sons, 1964.
- Allan C o x, Richard R. D o e l l, G. Brent D a l r y m p l e, Science 144 (No. 3226), 1537 (1964).
- Allan C o x and Richard R. D o e l l, Bull. Geol. Soc. America 71 (6), 645 (1960).
-