

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.382.3

ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ГЛОБАЛЬНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

В. И. Трухин

(кафедра физики Земли)

В статье рассмотрены основные свойства геомагнитного поля и проблемы использования различных моделей геомагнитного поля при исследованиях глобальных геофизических процессов. В качестве примера взято применение палеомагнитных методов в исследовании тектоники литосферных плит. Обсуждаются существующие модели геомагнитного поля, палеомагнитная модель поля, пути ее приближения к реальному полю. Большое внимание уделено проблеме самообращения намагниченности горных пород, которое является альтернативным инверсиям геомагнитного поля механизмом образования обратной намагниченности горных пород. Рассматриваются возможности совершенствования геофизических интерпретаций палеомагнитных данных.

Введение

Во многих исследованиях глобальных геофизических явлений и процессов учитывается влияние геомагнитного поля (ГМП). Непосредственное влияние геомагнитное поле оказывает на геофизические явления в магнитосфере Земли (взаимодействие магнитного поля с солнечным ветром и космическими лучами, полярные сияния, магнитные бури и суббури и т. д.), в ионосфере (ионосферные бури, изменение плотности заряженных частиц, морфология и динамика ионосферных слоев и т. д.), в нижней и средней атмосфере (концентрация озона), в земной коре (намагничивание горных пород), в ядре Земли (взаимодействие конвективных и турбулентных потоков электропроводящего внешнего ядра Земли с магнитным полем, генерация самого геомагнитного поля).

Непосредственные измерения геомагнитного поля проводятся только в последние 400 лет. Геомагнитное поле существует миллиарды лет, его эволюция тесно связана с эволюцией Земли. Предполагается, что ГМП возникло приблизительно через миллиард лет после образования Земли, когда у нашей планеты сформировалось ядро, внешняя часть которого является жидкой и электропроводящей. Нижняя граница внешнего ядра Земли находится на расстоянии ≈ 1180 км от центра Земли, верхняя граница — на расстоянии ≈ 3480 км [1].

В середине XX в. был разработан палеомагнитный (ПМ) метод исследования эволюции древнего ГМП, возраст которого превышает 400 лет. Как выяснилось в процессе исследований [2], намагниченные в разные геологические времена горные породы могут сохранять «память» о направлении и напряженности того древнего геомагнитного поля, в котором они намагничивались во время своего образования. Причиной их «памяти» являются ферромагнитные, антиферромагнитные и ферримагнитные минералы,

которые в небольших количествах (несколько процентов или несколько долей процента) входят в состав практически всех изверженных и осадочных горных пород. Основным информативным параметром намагниченных горных пород является естественная остаточная намагниченность (ЕОН).

Палеомагнитные исследования привели к совершенно новым и неожиданным результатам, основными из которых являются следующие:

1. Древние геомагнитные (палеомагнитные) полюса за последние 400–600 млн лет существенно отклонялись от положения современного геомагнитного полюса, при этом чем древнее палеомагнитный полюс, тем больше были отклонения. Кембрийский северный палеомагнитный полюс находился южнее экватора.

2. Кривые миграции палеомагнитных полюсов по измерениям ЕОН пород разных континентов существенно различаются между собой.

3. ГМП в прошлые геологические эпохи неоднократно изменяло свою полярность: происходили инверсии поля, которых, начиная с кембрия, насчитывается более тысячи.

Результаты ПМ исследований оказали существенное влияние на наши представления о генерации и эволюции геомагнитного поля и других глобальных геофизических процессов. Особенно тесно связанными оказались ПМ данные с современной концепцией тектоники литосферных плит. На основании этих данных определяются скорости движения литосферных плит, скорость спрединга океанского дна и его возраст, производятся реконструкции расположения плит в прошлые геологические эпохи и т. д. [3].

При интерпретации ПМ данных могут возникнуть проблемы, связанные со следующими особенностями ПМ метода:

1. Измеряется не само древнее ГМП, а ЕОН древних горных пород.

2. Математическая модель, по которой рассчитывается древнее поле, является довольно грубым приближением к модели реального ГМП. Это — модель центрального осесимметричного (аксиально-го) диполя, в которой магнитные полюса жестко привязаны к географическим, чего за последние 400 лет никогда не наблюдалось.

3. Ферримагнитные минералы не всегда намагничиваются точно по направлению геомагнитного поля из-за явлений анизотропии и зависимости внутренней энергии ферримагнетиков от внешних термодинамических условий.

4. Ферримагнитные минералы горных пород с течением времени эволюционируют, они окисляются, распадаются и испытывают другие химические изменения и превращения.

5. Существуют самопроизвольные переполюсовки ЕОН (самообращения ЕОН).

Детальное обсуждение этих проблем приведено в книге [3]. В данной работе мы хотим обратить внимание на два обстоятельства. Во-первых, на то, что интерпретация палеомагнитных данных о движении палеомагнитных полюсов производится так, как будто это не движение ПМ полюсов, а обратное движение участков земной поверхности, на которых были отобраны образцы для ПМ исследований. Достаточных оснований для такой интерпретации, по нашему мнению, не существует. Во-вторых, предполагается, что практически во всех случаях обнаруженные при ПМ исследованиях обратномагнитные горные породы несут информацию об инверсиях ГМП. Однако существует и другой механизм образования обратной (антипараллельной полю) намагниченности в ферримагнитных минералах горных пород. Это так называемое самообращение намагниченности, которое осуществляется за счет внутренних физико-химических процессов в ферримагнитных минералах. Таким образом, следует установить, в каких случаях горные породы приобрели свою обратную ЕОН в результате инверсий ГМП и в каких случаях — за счет самообращения ЕОН. По нашему мнению, это можно сделать, детально изучив возможные физические механизмы самообращения намагниченности распространенных в природе ферримагнитных минералов. В статье рассматриваются модели геомагнитного поля, недостатки модели палеомагнитного поля, а также результаты экспериментальных исследований процессов самообращения намагниченности пород.

Рассматриваются также современные представления о генерации геомагнитного поля.

Основные данные о геомагнитном поле.

Расчетные модели поля

Магнитное поле Земли играет огромную роль в жизни нашей планеты. Оно пронизывает всю Землю,

океан и атмосферу, воздействует на живую и неживую природу. ГМП дает возможность определять направление при движении надводных, подводных, воздушных и космических кораблей. Существование жизни на Земле в значительной степени связано с тем, что силовые линии геомагнитного поля, расположенные на расстоянии нескольких тысяч километров от поверхности Земли, образующие магнитосферу Земли, являются барьером для проникновения к поверхности планеты космических частиц высоких энергий. Взаимодействие ГМП с солнечным ветром приводит к образованию в верхней атмосфере активных зон, где происходит превращение одних видов энергии в другие. Среди них можно выделить зоны полярных сияний и радиационные пояса, в которых в периоды магнитных бурь высыпаются потоки заряженных частиц.

По современным представлениям, геомагнитное поле генерируется во внешнем жидком электропроводящем ядре Земли, расположенном на глубине 2900 км. Это поле называется главным геомагнитным полем (ГГМП).

Основные свойства ГГМП [3, 4]:

1. В первом приближении главное поле является полем центрального, наклоненного к оси вращения Земли магнитного диполя. Магнитный момент земного диполя $\approx 8 \cdot 10^{15}$ Тл \cdot м³.

2. Напряженность поля изменяется в среднем от $35 \cdot 10^3$ нТл на экваторе до $65 \cdot 10^3$ нТл на полюсах.

3. Главному полю присущи вековые вариации, имеющие дискретный спектр (основные периоды 60, 600, 90, 1200, 1800, 8000 лет). Годовые изменения напряженности поля достигают $10^{-3} \div 10^{-2}$ от средней напряженности ГМП.

Имеет место западный дрейф недипольной части ГГМП со скоростью 0.2° /год относительно поверхности Земли.

Первая математическая модель геомагнитного поля была представлена профессором Казанского университета И. М. Симоновым в 1835 г. [5]. Это была модель центрального, наклоненного к оси вращения Земли диполя. Согласно этой модели, основанной на магнитном потенциале диполя, составляющие (элементы) геомагнитного поля можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} & \text{Северная составляющая} \\ & X = g_1^0 \cos \varphi - (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \varphi \\ & \text{Восточная составляющая} \\ & Y = g_1^1 \sin \lambda - h_1^1 \cos \lambda \\ & \text{Вертикальная составляющая} \\ & Z = 2 [g_1^0 \sin \varphi + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \cos \varphi] \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\text{Магнитное склонение } D = \arctg Y/X, \quad (2)$$

$$\text{Магнитное наклонение } J = \arctg Z/\sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (3)$$

где λ, φ — географические координаты точки, где измеряется поле, g_1^0, g_1', h_1' — постоянные коэффициенты, которые зависят от величины магнитного момента диполя и угла его наклона к оси вращения. Изначально их величины неизвестны.

Если будут измерены X, Y, Z , то уравнения (1) можно решить относительно g_1^0, g_1', h_1' и определить их величины. Зная эти величины, можно рассчитать X, Y, Z в любой точке на поверхности Земли. Кроме того, можно определить магнитный момент диполя M и координаты геомагнитного полюса (φ_0, λ_0):

$$M = R^3 \sqrt{g_1^{02} + g_1'^2 + h_1'^2}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = g_1^0 / \sqrt{g_1'^2 + h_1'^2}, \quad \operatorname{tg} \lambda_0 = h_1' / g_1', \quad (5)$$

где R — радиус Земли.

В модели аксиального диполя, которая используется в палеомагнетизме, элементы ГМП X, Y, Z, D, J равны

$$\begin{aligned} X &= \frac{M}{R^3} \cos \varphi, & Y &= 0, & Z &= \frac{2M}{R^3}, \\ D &= 0, & J &= \operatorname{arctg} \frac{Z}{X}. \end{aligned} \quad (6)$$

Математическую модель геомагнитного поля в самом общем виде разработал К. Гаусс в 1838 г. Он использовал решение уравнения Пуассона для магнитного потенциала U неоднородно намагниченной Земли в сферической системе координат:

$$U = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^n \frac{R^{n+2}}{r^{n+1}} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) P_n^m(\cos \theta), \quad (7)$$

где R — радиус Земли, r — текущая координата, g_n^m, h_n^m — неизвестные коэффициенты, $P_n^m(\cos \theta)$ — присоединенные функции Лежандра, θ — дополнение до географической широты ($\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$). Соответствующие производные в сферической системе координат определяют составляющие ГМП: $X = -\frac{\partial U}{r \partial \theta}$, $Y = -\frac{\partial U}{r \sin \theta \partial \lambda}$, $Z = -\frac{\partial U}{\partial r}$.

Ряд Гаусса имеет бесконечное число членов и дает возможность рассчитывать геомагнитное поле с любой степенью приближения. Член ряда с $n = 1$ описывает поле наклоненного земного диполя, что получил ранее И. М. Симонов [5]. Поле такого диполя — это около 90% всего ГМП. В связи с необходимостью учета вековых вариаций Международная ассоциация по геомагнетизму и аэрономии каждые пять лет утверждает число членов ряда Гаусса, которое наилучшим образом согласуется с данными геомагнитных обсерваторий. Это так называемое «Международное эталонное геомагнитное поле». В этой модели в настоящее время используется разложение вплоть до функций Лежандра 10-й степени (всего 120 коэффициентов Гаусса).

Концепция тектоники плит

Рассмотрим кратко концепцию тектоники плит (КТП), для обоснования и развития которой широко использовались ПМ данные.

В геофизике уже давно существовало два принципиально различных подхода к рассмотрению эволюции нашей планеты: фиксизм (стабильное развитие) и мобилизм.

Мобилизм как антитеза развитию Земли возник в 1915 г. после выхода в свет книги Альфреда Вегенера [6] «Происхождение материков и океанов». Основываясь на сходстве (зеркальной симметрии) очертаний противоположных берегов Атлантического океана и привлекая к рассмотрению другие, известные в то время геофизические материалы (гипсометрическую карту Земли, теорию изостазии, данные о скоростях сейсмических волн под континентами и океанами), Вегенер предположил, что современная структура материков является следствием раскола древнего праматерика Пангеи и раздвижения его отдельных частей под действием силы вращения Земли. Складчатые горные цепи, по представлению Вегенера, возникали перед фронтом движущегося материка. Сторонников идей Вегенера было существенно меньше, чем противников, поэтому идеи мобилизма активно не развивались.

Всплеск идей мобилизма приходится на пятидесятые годы XX столетия. Это было связано прежде всего с тем, что сейсмические исследования показали, что земная кора под океанами сильно отличается от континентальной (~ 50 км), она очень тонка (5–10 км). Кроме того, в эти годы начали развиваться ПМ исследования, которые давали возможность получения количественных оценок масштабов перемещения отдельных литосферных блоков. В частности, ПМ данные показали, что в позднем палеозое и в мезозое имело место отодвигание Европы от Северной Америки, что подтверждало гипотезу Вегенера. В 50-е годы ряд исследователей выступили с идеями неомобилизма, суть которых состояла в предположении о существовании течений в глубине Земли, под действием которых происходит перемещение континентов или их частей.

Основополагающие идеи концепции тектоники плит в применении ко дну океана были сформулированы в статьях [7, 8]. Суть идей состоит в том, что на осях подводных срединно-океанских хребтов в результате магмоизвержений происходит образование новой океанской коры, которая симметрично растекается в стороны. Причиной этого растекания (спрединга) является тепловая конвекция в мантии. Р. Дитц писал [7]: «Срединно-океанские хребты маркируют восходящие мантийные потоки, или зоны дивергенции; глубоководные желоба ассоциируются с зонами конвергенции, или с нисходящими мантийными потоками». Таким образом, в природе существуют как бы ленты эскалаторов, которые выходят в центральных частях подводных хребтов,

движутся вдоль ложа океана и погружаются перед континентами в глубоководные желоба.

Существенным дополнением к этим идеям явилась опубликованная в 1963 г. гипотеза [9], связавшая растянутое во времени образование в центрах океанских хребтов горных пород и их движение в стороны от хребтов с инверсиями геомагнитного поля. Тем самым было дано объяснение образованию знакопеременных линейных магнитных аномалий, симметричных по обе стороны хребтов.

Вся литосфера Земли состоит из 10–12 крупных плит, которые перемещаются друг относительно друга со скоростью 1–10 см/год. При масштабном раздвижении литосферных плит возникают океаны, при сжатии — горные массивы.

Интенсивная вулканическая деятельность в некоторых местах внутри литосферных плит (как под океанами, так и на континентах), согласно КТП, связана с существованием так называемых «горячих точек», которые находятся на глубине более 200 км (ниже основания литосферных плит). «Горячие точки» — длительно действующие магматические очаги — поставляют на поверхность континентов и океанов базальтовую магму, при этом очаг «горячей точки» остается на месте, а вышележащие литосферные плиты перемещаются. В результате на поверхности Земли образуется цепочка вулканов, возраст которых уменьшается в направлении, обратном движению плиты.

В рамках КТП было предложено как объяснение раскола Пангеи и раздвижения ее обломков (современных материков), так и образование между ними Атлантического, Индийского и других океанов. Не все геологи и геофизики поддерживают КТП. По мнению некоторых исследователей КТП, существует ряд вопросов, на которые КТП не отвечает.

Один из крупнейших геофизиков XX в. академик В. А. Магницкий еще в 1960 г. писал: «Можно уверенно говорить, что земная кора выделилась из оболочки в процессе развития Земли, поэтому из установленного наблюдениями равенства тепловых потоков на континентах и океанах следует вывод, что не существовало крупных горизонтальных перемещений (порядка тысяч километров) больших блоков земной коры, как то предполагает гипотеза мобилизма. В противном случае это привело бы к отличию интенсивности тепловых потоков на континентах и океанах в 1.5–2 раза. Следовательно, континенты и океаны в общем возникли примерно на тех местах, где они сейчас расположены».

Палеомагнитная модель поля

Как отмечалось выше, в качестве модели геомагнитного поля при палеомагнитных исследованиях принимается модель поля аксиального диполя, в которой географические полюса всегда совпадают с геомагнитными. В настоящее время расчетная ось магнитного диполя наклонена к оси вращения на

угол около 12° и существенно (на $2\text{--}3^\circ$) изменяет свое положение относительно оси вращения в последние 400 лет, в течение которых ведутся измерения ГМП. Что было за прошлые сотни миллионов лет, трудно сказать.

В модели аксиального, неподвижного диполя предполагается, что происходило смещение литосферных плит, а не магнитного полюса, поэтому в соответствии с (6) древняя широта φ_d точки наблюдения, где производится отбор образцов, определяется так:

$$\operatorname{tg} \varphi_d = 0.5 \operatorname{tg} J_d, \quad (8)$$

где J_d — угол наклона древнего поля, который определяется по направлению естественной остаточной намагниченности горной породы.

Современные координаты (φ_0, λ_0) древнего геомагнитного полюса, согласно этой модели, рассчитываются по формулам

$$\begin{aligned} \sin \varphi_0 &= \sin \varphi \sin \varphi_d + \cos \varphi \cos \varphi_d \cos D; \\ \sin(\lambda - \lambda_0) &= \sin D \cos \varphi_d / \cos \varphi_0, \end{aligned} \quad (9)$$

где φ, λ — координаты точки отбора образцов, D — древнее склонение, определяемое по ЕОН.

Таким образом, в модели нет самостоятельного магнитного полюса, который бы перемещался независимо от географического. А на практике мы как раз наблюдаем постоянные блуждания магнитного полюса на приличном расстоянии от географического. В 2000–2002 гг. северный магнитный полюс приблизился к северному географическому на расстояние около 1000 км, а в 1904 г. это расстояние было 2167 км, южный магнитный полюс, напротив, стремительно удаляется от южного географического. В 1841 г. он находился в глубине Антарктиды на расстоянии 1659 км от географического. В 2000 г. измерения положения южного магнитного полюса показали, что он уже давно сошел с материка и находится в Индийском океане. В декабре 2000 г. южный магнитный полюс находился напротив побережья земли Адели (координаты $64^\circ 40'$ ю. ш., $138^\circ 07'$ в. д.). Отсюда до географического полюса около 2810 км, и это расстояние со временем продолжает увеличиваться [10].

Следовательно, жесткая привязка магнитного полюса к географическому в палеомагнитной модели требует очень серьезного обоснования.

Более того, палеомагнитные расчеты (9) показывают, что в прошлые геологические эпохи происходило существенное перемещение геомагнитных полюсов. Однако движение геомагнитных полюсов признается невозможным из-за особенностей интерпретации ПМ модели, и поэтому это движение интерпретируется как обратное движение соответствующих участков литосферы.

Возможно, что в прошлые геологические эпохи происходили как перемещения литосферных плит, так и миграция геомагнитных полюсов. Поэтому

расчетные ПМ модели в идеале должны давать возможность рассчитать движения и полюсов и литосферных плит. По-видимому, это было бы возможно, если бы использовались две модели ГМП: поле аксиального диполя и поле центрального диполя, наклоненного под некоторым углом к оси вращения Земли. Однако в этом случае в соответствии с (3) выражение для $\text{tg } J_d$ будет иметь очень сложный вид.

К существенным погрешностям ПМ измерений может приводить и длительное нахождение изначально намагниченных горных пород в течение многих тысяч и миллионов лет под действием геомагнитного поля и изменяющихся термодинамических условий.

Задача определения древнего поля по величине и направлению ЕОН очень сложна и неоднозначна. Для того чтобы ее решать с большей степенью достоверности, необходимо продолжать физические исследования образования и эволюции ЕОН и совершенствовать методы расчета и интерпретации ПМ данных.

Самообращение намагниченности горных пород

Самообращение намагниченности — это такое явление, при котором антипараллельная направлению магнитного поля намагниченность возникает за счет внутренних процессов в ферромагнитном минерале. Наиболее распространенными в природе являются эффекты самообращения в ферромагнитных минералах при их термонамагничивании и в процессе их химических превращений.

Явление самообращения термоостаточной намагниченности (ТОН) впервые наблюдалось на породах горы Харуна (Япония), содержащих гемоильменит [2]. С теоретической точки зрения самообращение намагниченности в горных породах не является неожиданным эффектом. Это связано с тем, что основными носителями ЕОН в них являются ферромагнитные минералы.

Первые теоретические модели самообращения были разработаны Неелем [11, 12]. В дальнейшем различные физические механизмы экспериментально установленных случаев самообращения намагниченности горных пород обсуждались во многих работах [13–18, 3]. Однако общепринятого мнения о механизме самообращения ЕОН ферромагнитных минералов до сих пор не существует.

Проблема самообращения и его механизма имеет фундаментальное значение для геомагнетизма и современной глобальной геофизики, так как в результате самообращения возникает обратная ЕОН горных пород, которая, по современным представлениям, образуется, как правило, при смене полярности (инверсиях) геомагнитного поля. Только в случае, если будет известен механизм самообращения, появится возможность лабораторной диагностики

обратной намагниченности и определения ее происхождения. В настоящее время в связи с небольшим количеством обнаруженных случаев самообращения на горных породах считается, что вероятность процесса самообращения чрезвычайно мала.

В связи с тем что минералы после их образования из магмы на поверхности Земли во время их охлаждения и в течение их дальнейшей геологической истории претерпевают существенные химические изменения, самообращение может произойти на каком-то этапе эволюции минералов. В дальнейшем свойство самообращения может быть утрачено, а обратная ЕОН сохранится.

Нами [19] было обнаружено и исследовано явление самообращения намагниченности на образцах алмазоносных кимберлитов Якутии. Носителями намагниченности кимберлитов были ферримагнитные минералы пикроильмениты (аналоги гемоильменитов).

На рис. 1 в качестве примера представлены результаты лабораторного эксперимента по термонамагничиванию образца кимберлита из трубки «Мир», которое моделирует природный процесс намагничивания изверженных горных пород.

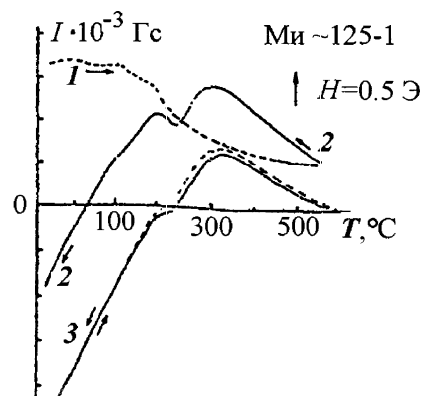


Рис. 1. Самообращение полной и остаточной термонамагниченности при охлаждении от 570 °С

Кривая 1 показывает изменение магнитной восприимчивости при изменении температуры от 20 до 550 °С. Кривая 2 — ход намагниченности при охлаждении образца от 570 до 20 °С в поле $H = 0.5$ Э. Сплошная кривая 3 — изменение остаточной намагниченности при $H = 0$ в интервале температур (20–570 °С). Таким образом, в процессе охлаждения образца в поле $H = 0.5$ Э (кривая 2) при $T \leq 70$ °С возникает намагниченность, направление которой антипараллельно полю H . Это и есть процесс самообращения намагниченности горной породы.

Экспериментально был определен состав пикроильменитов. Синтезированные в Институте экспериментальной минералогии гемоильмениты такого же состава, как и пикроильмениты, в процессе охлаждения также приобретали намагниченность, антипараллельную приложенному полю [20]. Было также обнаружено и исследовано самообращение

якутских траппов, где носителями намагниченности были титаномагнетиты [19].

Явление самообращения намагниченности наблюдалось и на других горных породах, содержащих титаномагнетиты и гематиты. В последнее время особый интерес вызывает исследование самообращения ТОН океанских базальтов, магнитные свойства которых определяются в основном однофазно и гетерофазно окисленными титаномагнетитами.

В подводных базальтах было обнаружено, что обратная термоостаточная намагниченность возникает в результате лабораторного прогрева образца, когда его T_c поднимается до $\approx 350^\circ\text{C}$, т.е. на катиондефицитных титаномагнетитах определенного состава [21].

В образцах базальтов, драгированных с морского дна из трансформного разлома Романш (Центральная Атлантика) и из тройственного сочленения Буве в районе хребта Шписс (Южная Атлантика), было также найдено небольшое количество образцов со свойствами самообращения ТОН [22, 23].

Таким образом, при исследовании образцов горных пород разного происхождения и содержащих различные ферромагнитные минералы наблюдаются случаи самообращения термоостаточной намагниченности. Пока самообращающихся образцов найдено очень мало по сравнению с огромным количеством образцов, на которых получены основные палеомагнитные результаты и сделаны выводы о геомагнитных инверсиях, происходивших на протяжении последних 500–600 млн лет. Однако следует принимать во внимание, что имеется еще один механизм образования обратной ЕОН пород помимо инверсий ГМП.

Изложим физику явления самообращения намагниченности в соответствии с полученными нами результатами [24].

Энергия магнитного момента \mathbf{M} во внешнем магнитном поле \mathbf{H} равна

$$E_H = -(\mathbf{M} \cdot \mathbf{H}) = -MH \cos \varphi, \quad (10)$$

где φ — угол между \mathbf{M} и \mathbf{H} . При $\varphi = 0$ энергия будет наименьшей, поэтому момент ориентируется по \mathbf{H} .

Однако при термонамагничивании в лабораторных условиях некоторых природных ферромагнетиков наблюдаются случаи антипараллельной по полю \mathbf{H} ориентации суммарной термонамагниченности I_T (и термоостаточной намагниченности ТОН).

Такое состояние может быть достигнуто в ферромагнетике из-за его сложного строения. Спонтанный магнитный момент M_s двухподрешеточного ферромагнетика изначально по своей природе состоит из двух антипараллельно направленных, не равных по величине моментов (M_{AS} и M_{BS}) магнитных подрешеток A и B :

$$\mathbf{M}_S = \mathbf{M}_{BS} - \mathbf{M}_{AS}. \quad (11)$$

Поэтому, если $M_{BS} > M_{AS}$, то при ориентации суммарной \mathbf{M}_S по направлению \mathbf{H} значительная часть атомных магнитных моментов, сумма которых равна \mathbf{M}_{AS} , будет ориентирована антипараллельно \mathbf{H} .

Рассмотрим схему процесса термонамагничивания (рис. 2).

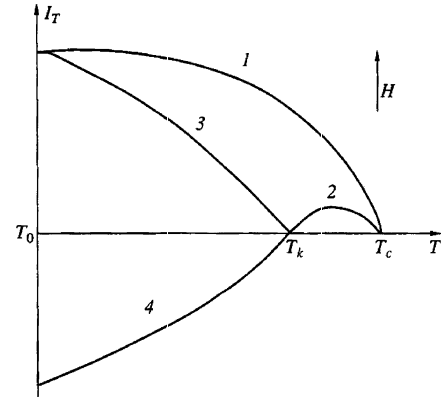


Рис. 2. Схема процесса термонамагничивания: 1 — $I_T(T)$ ферромагнетика, в котором отсутствует точка компенсации; 2 — зависимость $I_T(T)$ в интервале температур (T_c, T_k) ферромагнетика с точкой компенсации T_k ; 3 — $I_T(T)$ в интервале температур (T_k, T_0) при $H > H_c$; 4 — $I_T(T)$ в интервале температур (T_k, T_0) при $H < H_c$.

В ферромагнетике без самообращения намагниченности идет монотонный процесс увеличения намагниченности, ориентированной по полю \mathbf{H} (кривая 1).

Ориентации и величины магнитных моментов M_{AS} , M_{BS} в подрешетках A и B определяются величинами обменных взаимодействий внутри подрешеток (энергии E_A и E_B) и между подрешетками (E_{AB}). Существенным является то, что все эти величины (M_{AS} , M_{BS} , E_A , E_B , E_{AB}) могут изменяться с изменением температуры. Изменения могут быть настолько существенными, что при охлаждении ферромагнетика от $T = T_c$ при некоторой температуре компенсации T_k в доменах ферромагнетика происходит смена знака M_s из-за того, что при $T > T_k$ превалировала намагниченность подрешеток B , а при $T < T_k$ намагниченность подрешеток A становится больше намагниченности подрешеток B . Это относится и к спонтанной намагниченности всего ферромагнитного образца. Возможность существования ферромагнетиков, у которых при некоторой $T = T_k$ происходит компенсация магнитных моментов подрешеток $M(T_k) = 0$ (кривые N-типа), была установлена теоретически [11, 12], а в дальнейшем многократно подтверждалась экспериментально.

При термонамагничивании «самообращающегося» ферромагнетика в интервале температур $T_k < T < T_c$ будет возникать намагниченность I_T , ориентированная по направлению \mathbf{H} , сначала по мере охлаждения от T_c увеличивающаяся, затем при приближении T к T_k уменьшающаяся, в связи с уменьшением M_s ферромагнетика. При $T = T_k$ намагниченность $I_T = 0$ (кривая 2). При дальней-

шем охлаждении ниже T_k могут встретиться два случая, зависящих от величины M_S доменов и от соотношения величин коэрцитивной силы H_c и внешнего поля H .

Если при $T < T_k$ поле $H > H_c$, то при дальнейшем охлаждении ниже T_k достаточно большое поле H будет разворачивать антипараллельные M_S доменов и намагниченность будет вновь увеличиваться по направлению поля (кривые 2, 3). А в случае если $H < H_c$, разворот доменов по полю ввиду малости полевой энергии E_H будет невозможен и при $T < T_k$ за счет роста M_S , направленной по M_{SA} , I_T будет увеличиваться в антипараллельном по отношению к H направлении (кривые 2, 4).

Таков, по нашему мнению, физический механизм самообращения ЕОН горных пород. При этом смена знака M_S в ферромагнетиках может происходить как при изменении T , так и в течение длительного времени в результате диффузии катионов между подрешетками ферромагнетика.

Как уже отмечалось, возможны и другие механизмы самообращения ЕОН, о которых сообщается в литературе [2, 18]. Это механизмы самообращения, наблюдающиеся в двухфазных минералогических системах, за счет магнитоэлектрического или обменного взаимодействия между фазами.

Несмотря на экспериментально обнаруживаемые случаи самообращения намагниченности, существует большое число фактов, которые свидетельствуют в пользу возникновения обратной естественной остаточной намагниченности за счет инверсий ГМП, а не в результате самообращения. Прямая и обратная намагниченность наблюдается на изверженных и осадочных горных породах. Чередование слоев с прямой и обратной намагниченностью практически одинаковое у изверженных и осадочных пород, образовавшихся в одном и том же временном интервале. Такая закономерность наблюдается и для осадков на дне океана, для озерных отложений и т. д. Именно это дало возможность создать мировую магнито-хронологическую шкалу инверсий, где все инверсии имеют абсолютную датировку [3].

Задача наших исследований заключается в том, чтобы определить роль и место самообращенной намагниченности. В настоящее время практически не существует методов, с помощью которых можно было бы определить, в результате какого процесса (инверсия или самообращение) возникла в данном образце горной породы обратная намагниченность.

Это можно определить только для ТОН в исключительных случаях, когда ферромагнитные минералы сохранили свойство самообращения намагниченности до момента их исследования в лаборатории.

О происхождении ГМП

Все современные теории происхождения ГМП основываются в общих чертах на явлении суточного вращения Земли, а в динамо-теориях используется

явление западного дрейфа ГМП, причиной которого, как предполагается, является небольшая разность ($\approx 0.2^\circ$ в год) угловых скоростей вращения мантии и верхних слоев ядра Земли. Оба эффекта являются однонаправленными и непосредственно на их основе нельзя объяснить существование инверсий ГМП.

В книге [25] дано подробное изложение возможных моделей инверсий ГМП. Представлено девять таких моделей, которые используют для объяснения инверсий: магнитогидродинамические неустойчивости в ядре Земли, турбулентность, нестабильность конвективных потоков, воздействие со стороны мантии и т. д. К сожалению, теоретически приемлемой и общепринятой модели инверсий пока не разработано. Более продвинуты теории происхождения ГМП. Однако и здесь встречаются серьезные трудности.

Если говорить о современных теориях происхождения геомагнитного поля, то следует начать с теории динамоэффекта Френкеля [26], который впервые выдвинул разумную идею регенерации поля за счет вихревых движений в жидком электропроводящем ядре. В дальнейшем основополагающие работы по теории земного диполя выполнили авторы работ [27, 28]. Основой современных теорий являются уравнения магнитной гидродинамики: уравнение для магнитного поля, гидродинамическое уравнение движения жидкости Навье-Стокса и уравнение неразрывности.

Как показывают исследования [1], магнитное поле \mathbf{B} состоит из двух частей: тороидальное поле \mathbf{B}_T и полоидальное \mathbf{B}_p (каковым и является наблюдаемое на поверхности Земли ГМП). Между этими полями существует простая связь:

$$\text{rot } \mathbf{B}_T = \mathbf{B}_p. \quad (12)$$

Из этого уравнения следует, что необходимо прежде всего построить теорию для нахождения \mathbf{B}_T и тогда достаточно просто получить искомое \mathbf{B}_p .

В принципе уравнения магнитной гидродинамики дают возможность в случае их строгого решения определить, существует ли самовозбуждающееся динамо в ядре Земли. Однако даже если бы были точно известны все члены уравнений, решение их было бы крайне затруднительно. А если учесть, что в применении к ядру Земли значения многих параметров уравнений либо известны приблизительно, либо вообще неизвестны, то задача гидромагнитного динамо Земли в такой общей постановке в настоящее время неразрешима.

Динамо теории генерации и поддержания ГМП обсуждаются во многих публикациях, например в [29]. Существуют многочисленные варианты возможных механизмов возбуждения ГМП: кинематические теории динамо, динамические теории, гидромагнитные, статические, турбулентные и т. д.

Все перечисленные варианты теорий происхождения ГМП ограничены из-за отсутствия достоверной информации о тороидальном поле в районе источни-

ка генерации поля, коэффициенте вязкости среды в источнике и о существовании турбулентных потоков в районе источника. Ограничена информация и о других параметрах источника.

В связи с этим отсутствуют и точные оценки энергетики в источнике, где действует динамо-механизм.

Существенным является вопрос о возможной напряженности тороидального поля B_T . По разным данным [30, 31], B_T должно быть не менее 100 Гс, а в теориях гидромагнитного динамо 200 ÷ 500 Гс. Но такое большое поле фиксировалось бы на поверхности Земли, так как жидкое ядро Земли, где, по предположению, должен находиться источник поля, имеет сравнительно небольшую электропроводность ($\sigma \approx 5 \cdot 10^5$ См) и поэтому не может экранировать такое большое поле. Согласно [32], полоидальное поле B_p , которое на поверхности Земли равно 0.6 Гс, на глубине источника (4900 км) имеет напряженность всего 30 Гс.

Наиболее разработанной и поддерживаемой специалистами на сегодняшний день является теория $\alpha\omega$ -динамо, предложенная Паркером [33]. Согласно этой теории, в результате ω -эффекта из начального слабого полоидального поля возникает тороидальное поле $B_T \geq 100$ Гс, далее α -эффект приводит к вытягиванию силовых линий полоидального поля B_p из тороидального. Это поле B_p и наблюдается на поверхности Земли.

С. И. Брагинский рассмотрел кинематические модели с помощью уравнений генерации и показал, что можно подобрать правдоподобные скорости в ядре, которые приводят к генерации магнитного поля, близкого к реально наблюдающемуся. Из теории вытекает, что наличие несимметричных скоростей, необходимых для генерации поля, вызывает появление соответствующих несимметричных компонент магнитного поля B_T .

Отсюда следует, что наблюдающиеся поперечные составляющие магнитного диполя — наклон магнитной оси, а также более высокие гармоники, например квадрупольные, дающие эксцентриситет диполя, не являются случайными, а непосредственно связаны с самим механизмом генерации. Наличие этих составляющих связано с несимметричными движениями в ядре, приводящими к невыполнению условий запрещающей генерацию ГМП теоремы Каулинга.

Согласно теории С. И. Брагинского, возникающая в результате действия гидромагнитного динамо генерация главного поля не является стационарной, а испытывает ряд колебаний, которые можно сопоставить с периодами вековых вариаций ГМП.

Существуют альтернативные магнитогидродинамическим теории генерации геомагнитного поля. Так, в работе [32] приводятся сделанные им оценки скорости потока заряженных частиц в слое F ядра Земли на расстоянии ≈ 1500 км от центра Земли. Эта скорость равна 50 м/с, угловая скорость потока $3.4 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹, она меньше угловой скорости суточ-

ного вращения Земли, которая равна $7.3 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹. По мнению автора, этот поток заряженных частиц, контролируемый вращением Земли, в основном генерирует ГМП. Автор пишет, что возможна «генерация геомагнитного поля за счет индукции его крайне малым полем и дальнейшего поддержания за счет слабого динамо — механизма и стабильного вращения потока заряженных частиц в жидком ядре в связи с вращением Земли».

Однако в таком механизме генерации ГМП отсутствует возможность смены полярности поля (инверсии), так как потоки контролируются вращением Земли.

Заключение

Эволюция геомагнитного поля тесно связана с эволюцией Земли и строением ее внутренних недр. При создании теории геомагнитного поля и глобальных геофизических моделей, например концепции тектоники литосферных плит, учитываются и используются основные свойства геомагнитного поля, в особенности такое его фундаментальное свойство, как инверсии. Однако при этом не учитывается возможное перемещение на большие расстояния геомагнитных полюсов и самообращение ЕОН.

В настоящей статье обращается внимание на то, что, во-первых, следует совершенствовать модель палеомагнитного поля и методы интерпретации палеомагнитных данных. Во-вторых, необходимо учитывать альтернативный инверсиям процесс образования обратной намагниченности пород — самообращение намагниченности в ферромагнитных минералах за счет внутренних физико-химических процессов. По нашему мнению, в силу невозможности непосредственного изучения инверсий геомагнитного поля, которые продолжаются (если происходят) в течение нескольких тысяч лет, вопрос о соотношении вкладов инверсий и самообращения в обратное намагничивание пород можно решить путем исследования механизмов процессов самообращения намагниченности и оценки вероятности намагничивания пород за счет самообращения. Тем самым будет оценена и вероятность инверсий.

За последние годы автором с сотрудниками были обнаружены и исследованы различные «самообращающиеся» породы: кимберлиты и траппы Якутии, подводные океанские базальты Атлантического океана (разлом Романш, сочленение Буве, хребет Рейкьянес), базальты из рифтовой долины Красного моря и др. Были установлены физические механизмы процесса самообращения и обнаружено, что вероятность действия этого процесса возрастает по мере увеличения количества исследованных образцов горных пород.

Таким образом, в статье рассмотрены способы совершенствования модели палеомагнитного поля, предложен метод исследования глобальной фундаментальной проблемы инверсий геомагнитного поля

и и проведено изучение самообращения намагниченности горных пород и механизма этого явления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02-05-64274).

Литература

1. Джекобс Дж. Земное ядро. М., 1979.
2. Нагата Т. Магнетизм горных пород. М., 1965.
3. Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L. The magnetic field of the Earth. Academic Press, 1998.
4. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л., 1978.
5. Симонов И.М. Опыт математической теории земного магнетизма. Уч. зап. Казан. ун-та. Кн. 3. 1835. С. 49–68.
6. Wegener A. The origin of Continents and Oceans Methuen. London, 1924.
7. Dietz R.S. // Nature. 1961. **190**. С. 854.
8. Hess H.H. // History of Ocean basins. Geol. Soc. Amer., Boulder, Colorado. 1962. P. 599.
9. Wine F.J. and Matthews D.H. // Nature. 1963. **199**. P. 947.
10. Дьяченко А.И. Магнитные полюса Земли. Изд. Моск. центра непрер. математич. образ., 2003.
11. Neel L. // Ann. Geophys. 1951. **7**. P. 90.
12. Neel L. // Adv. Phys. 1955. **4**. P. 191.
13. Uyeda S. // Japan J. Geophys. 1958. **2**. P. 1.
14. Жилева В.А., Колесников Л.В., Петрова Г.Н., Тихонов Л.В. // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1971. № 10. С. 59.
15. Hoffman K.A. // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1975. **41**. P. 65.
16. Petherbridge J. // Ibid. 1977. **50**. P. 395.
17. McClelland E. and Goss C. // Geophys. J. Int. 1993. **112**. P. 517.
18. Dunlop D., Özdemir Ö. Rock Magnetism. Cambridge Univ. Press, 1997.
19. Трухин В.И., Жилева В.А., Зинчук Н.Н., Романов Н.Н. Магнетизм кимберлитов и траппов. М., 1989.
20. Трухин В.И., Жилева В.А., Конилов А.Н. // Физ. Земли. 1997. № 2. С. 52.
21. Трухин В.И., Жилева В.А., Шрейдер А.А. и др. // Там же. 2000. № 2. С. 68.
22. Трухин В.И., Жилева В.А., Шрейдер А.А. и др. // Там же. 2001. № 6. С. 86.
23. Трухин В.И., Жилева В.А., Шрейдер А.А. // Там же. 2002. № 8. С. 6.
24. Трухин В.И., Жилева В.А., Курочкина Е.С. // Там же. 2004. № 6. С. 42.
25. Jacobs J.A. Reversals of the Earth's Magnetic Field. Cambridge Univ. Press, 1994.
26. Френкель Я.И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1947. **11**, № 6. С. 607.
27. Elsasser W.M. // Phys. Rev. 1946. **70**. P. 202.
28. Bullard E.C. // Proc. Roy. Soc. London. 1949. **A199**. P. 413.
29. Backus G., Parker R., Constable C. Foundations of Geomagnetism. Cambridge Press, 1996.
30. Брагинский С.И. // Геом. и астрономия. 1964. **IV**, № 4. С. 732.
31. Goward A.M. // Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. 1991. **62**. P. 191.
32. Аксенов В.В. Электромагнитное поле Земли. Новосибирск, 2002.
33. Parker E.N. // Astrophys. J. 1955. **122**. P. 293.

Поступила в редакцию
17.11.04