

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
GEOLOGICAL INSTITUTE

S.V. Shipunov
ELEMENTS OF PALEOMAGNETOLOGY

Элементы палеомагнитологии / С.В. Шипунов - М.:
Геологический институт РАН, 1994. - 64 с. ISBN 5-201-12018-0

В книге рассмотрены физические основы палеомагнитного метода, методика отбора и лабораторной обработки палеомагнитных коллекций. Особое внимание уделено описанию способов выделения и датирования компонент намагниченности, оценке достоверности палеомагнитной информации. Рассмотрены критерии качества палеомагнитных данных, важные для правильной оценки палеомагнитных публикаций в специальной литературе. Приведены примеры применения палеомагнитного метода в тектонике и стратиграфии.

Книга рассчитана на широкий круг геологов и геофизиков и может быть рекомендована студентам старших курсов геологических и геофизических специальностей в качестве введения в палеомагнитологию.

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук Г.З. Гурарий

Редакционная коллегия:
Леонов (главный редактор),
В.Г. Гербова, С.А. Куренков, Ю.О. Гаврилов

Responsible editor
Doctor of Physics and Mathematics
G.Z. Gurary

Editorial board:
Yu.G. Leonov (Editor-in Chief),
V.G. Gerbova, S.A. Kurenkov, Yu.O. Gavrilov

ISBN 5-201-12018-0

© С.В. Шипунов, 1994
© Геологический институт РАН, 1994

Предисловие

Аннуццата. Но только... я могу рассказать вам кое-что известное мне, но неизвестное вам. Простите мне мою дерзость.

Ученый. Пожалуйста! Говорите! Учите меня! Я ведь ученый, а ученые учатся всю жизнь.

*Е. Шеври
Тень*

Эта книга написана на основе курса лекций, прочитанного мной студентам четвертого курса кафедры "Общая геология и геокартинирование" Московской геологоразведочной академии в осеннем семестре 1993 г.

Несмотря на то, что палеомагнитология в последнее десятилетие занимает все более прочное положение в системе наук о Земле, до настоящего времени не было выпущено пособия, предназначенного специально для геологов. Опыт работы в области геологических приложений палеомагнетизма убеждает меня в том, что существующие в настоящее время издания по палеомагнетизму сложны для этой категории читателей (см. библиографию в конце книги).

В объеме данной книги вряд ли возможно вместить достаточно полное описание палеомагнитологии как научной дисциплины. Поэтому скорее ее можно рассматривать как "самые начала" палеомагнитного метода. Целью книги является ознакомление геологов с основными понятиями палеомагнетизма на таком уровне, который позволил бы грамотно использовать палеомагнитные данные, сотрудничать в своих геологических исследованиях с палеомагнитологами, а также читать и понимать палеомагнитные статьи. Поэтому, если бы так было принято, я бы назвал эту книгу: "Как читать и понимать палеомагнитные статьи". Она может быть также полезна студентам старших курсов геологических и геофизических вузов как введение в специальность "Палеомагнитология".

Палеомагнитология, стоящая несколько особняком от других геофизических наук, наиболее приближена к собственно геологии и способна решать истинно геологические задачи. С помощью палеомагнитного метода возможна корреляция удаленных геологических разрезов, вплоть до глобальной корреляции. Палеомагнитология

применяется также для тектонических реконструкций, таких, как перемещение континентальных блоков, или для решения более локальных задач по выявлению взаимных перемещений и вращений отдельных участков земной коры или других геологических объектов.

Многие вопросы, связанные с теорией палеомагнетизма, рассмотрены в книге на элементарном уровне. Кроме того, в ней ничего не говорится о некоторых очень важных приложениях палеомагнитного метода, таких, например, как изучение вековых вариаций и инверсий земного магнитного поля, определение степени его дипольности, проверка гипотезы расширяющейся Земли и др. Это обусловлено прежде всего практической направленностью книги.

В книге также не затрагивается проблема выбора геологического объекта - этот вопрос требует специального рассмотрения и во многом зависит от опыта.

Примеры, иллюстрирующие применение палеомагнитного метода в тектонике и стратиграфии, взяты в основном из моей практики. Это не означает, что нет более показательных работ других авторов. Просто так оказалось удобнее.

Овладение изложенным материалом позволит читателю ориентироваться в широком классе важных прикладных палеомагнитных задач и одновременно подготовит его к изучению более трудных книг и статей палеомагнитного содержания.

Автор благодарен доктору геолого-минералогических наук, профессору М.К.Бахтееву за организацию курса и постоянное внимание. Я также признателен доктору физико-математических наук Г.Э.Гурарию, взявшему на себя труд по редактированию рукописи. М.А.Баженков, Ю.С.Бретштейн, Д.М.Печерский, С.А.Писаревский и А.Н.Храмов прочитали рукопись книги. Сделанные ими замечания, направленные главным образом на достижение большей строгости, ясности и простоты изложения, способствовали превращению разрозненных глав конспекта лекций в предлагаемую читателю книгу.

Я не считаю, что полностью исчерпал всю проблематику, затронутую в книге, и буду благодарен за любую критику, направленную на улучшение содержания и стиля изложения.

Чистильщик сапог. Но согласно придворному этикету вы должны были обратиться сначала ко мне.

Е. Шарц
Голый король

Глава 1

Физические основы палеомагнетизма

Тень. Вот вам последние выводы моей науки.

Е. Шарц
Тень

Наша планета обладает магнитным полем. В первом приближении геомагнитное поле можно отождествить с полем центрального магнитного диполя, т.е. небольшого по сравнению с диаметром Земли магнита, находящегося в ее центре (рис. 1.1).

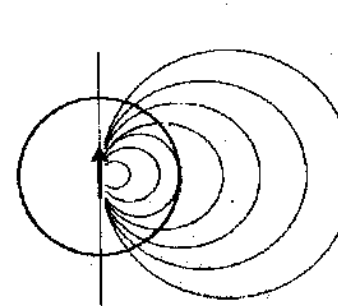


Рис. 1.1. Приблизительная картина распределения силовых линий геомагнитного поля

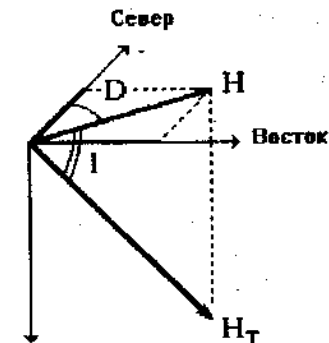


Рис. 1.2. Элементы земного магнетизма

Характеристикой магнитного поля Земли служит вектор напряженности геомагнитного поля H_T , который определяет направление поля и его силу. К основным элементам вектора напряженности геомагнитного поля H_T на земной поверхности относятся его направление, определяемое склонением D и наклоением I , и величина вектора (рис. 1.2). Склонение характеризует отклонение проекции вектора напряженности геомагнитного поля на горизонтальную

плоскость от направления на географический северный полюс, наклонение - угол между горизонтальной плоскостью и вектором напряженности H_T .

Проекции концов геомагнитного диполя на земную поверхность называются геомагнитными полюсами. В настоящее время геомагнитные полюса не совпадают с географическими. Это одно из следствий так называемых вековых вариаций, заключающихся в изменении во времени элементов геомагнитного поля. Прямыми наблюдениями земного магнитного поля за последние примерно 400 лет (они были начаты во времена Гальберта), а также по результатам магнитных наблюдений на археомагнитных объектах и молодых горных породах установлено, что геомагнитный полюс перемещается вокруг географического таким образом, что в среднем его положение совпадает с географическим.

Поэтому можно рассматривать магнитное поле Земли, осредненное за некоторый небольшой в геологическом масштабе промежуток времени, как поле центрального осевого магнитного диполя, т.е. диполя, находящегося в центре Земли, ось которого совпадает с осью ее вращения. Геомагнитный полюс, осредненный с целью исключения вековых вариаций геомагнитного поля, называется палеомагнитным полюсом. В дальнейшем, если это не оговорено особо, будем полагать совпадающими геомагнитные и географические полюса.

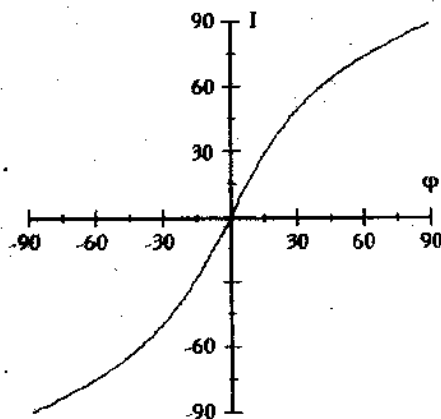


Рис. 1.3. Зависимость наклона геомагнитного поля от широты

Геометрическая конфигурация магнитного поля центрального осевого магнитного диполя имеет одну очень важную особенность - наклонение геомагнитного поля I определяется широтой места ϕ . Например, вектор напряженности магнитного поля Земли, направление которого совпадает с направлением силовых линий геомагнитного поля на рис. 1.1, на северном геомагнитном полюсе направлен вертикально вниз, на южном -

вертикально вверх, на экваторе - вектор напряженности горизонтален и направлен в сторону северного геомагнитного полюса (рис. 1.1).

Ниже приведена простая формула, связывающая наклонение геомагнитного поля с широтой места:

$$\operatorname{tg}(I) = 2 \operatorname{tg}(\phi). \quad (1.1)$$

Здесь I - наклонение магнитного поля; ϕ - широта места (рис. 1.3).

Рассмотрим пример применения этого простого факта - пока не с геологической целью. На территории России известны фарфоро-фаянсовые заводы в Санкт-Петербурге, Конаково (рядом с Тверью) и Дулево (под Москвой). Предположим, что фарфоровые кружки в печи при обжиге устанавливались вертикально, т.е. так, как они обычно стоят на столе во время чаепития.

При обжиге кружков и последующем их охлаждении в магнитных минералах, содержащихся в каолине, из которого в основном состоит эти изделия, образуется так называемая термоостаточная намагниченность. И если на прошедших обжиг кружках не окажется заводского клейма, то по наклонению намагниченности можно определить широту расположения завода, а в нашем случае, так как местонахождение заводов различается по широте, и сам завод.



Рис. 1.4. Наклонение намагниченности на различных фарфоровых заводах

Для этого достаточно измерить с необходимой точностью на приборе, измеряющем компоненты вектора намагниченности (магнитометре), направление намагниченности (в том числе - наклонение) и по выше приведенной формуле определить широту местонахождения завода-изготовителя (рис. 1.4).

Можно воспользоваться не целой кружкой, а небольшим ее осколком, тогда следует предварительно ее разбить. Эта процедура более приближена к палеомагнитной практике - ведь при проведении палеомагнитных исследований в геологических целях, как правило,

приходится отбирать образцы горных пород. В этом случае необходимо установить, из какого участка кружки был взят осколок, и запомнит это положение.

При определении широты местонахождения завода использовалось предположение о том, что образующаяся при обжиге керамических изделий намагниченность совпадает с направлением земного поля на заводе-изготовителе, а также предположение об известном положении кружек при обжиге.

Кроме определения широты места изготовления кружки можно ориентировать кружку по отношению к сторонам света, т.е. определить, какой стороной она была обращена к северу во время обжига. Это производится с использованием склонения намагниченности, и так как вектор намагниченности во время обжига обращен к северу, то, развернув кружку соответствующим образом, мы получим ее первоначальное положение.

Приблизительно такая же последовательность операций проводится при палеомагнитных исследованиях на реальных геологических объектах. Но для того чтобы в принципе можно было использовать магнитное поле Земли в геологических приложениях, оно должно каким-то образом фиксироваться в реальных геологических объектах так, как это происходит в глинах при обжиге.

Палеомагнетизм - физическое явление, заключающееся в фиксации и сохранении направления и величины геомагнитного поля магнитными минералами горных пород в виде вектора остаточной намагниченности. Палеомагнетология - наука о палеомагнетизме, т.е. наука, изучающая это явление.

Несколько слов о намагниченности вообще и в горных породах в частности. Различают индуктивную и остаточную намагниченность. Индуктивная намагниченность в отличие от остаточной существует только в присутствии внешнего магнитного поля. Следующая формула определяет суммарную намагниченность:

$$J = kH + J_r \quad (1.2)$$

где k - магнитная восприимчивость; J_r - остаточная намагниченность; H - величина напряженности магнитного поля. В геологических приложениях палеомагнетологии используют, как правило, остаточную намагниченность J_r .

Лишь некоторое, крайне ограниченное количество природных минералов способно приобретать и сохранять остаточную намагниченность. Эти магнитные минералы содержатся (хотя и в очень малой концентрации) практически во всех горных породах, и связанная с ними остаточная намагниченность может быть измерена на современной аппаратуре.

Первоначально для этих природных минералов использовалось общее название - ферромагнетиты, т.е. вещества, способные к магнитному самоупорядочиванию. Впоследствии они были подразделены на несколько видов и термин "ферромагнетит" стал применяться только для редко встречающихся в природе минералов, например для самородного железа. В дальнейшем изложении будем применять для всех этих веществ более общий термин - "магнитные минералы".

Назовем самые распространенные из них:

- магнетит (температура Кюри 580°C);
- гематит (температура Кюри 675°C);
- титаномагнетит (температура Кюри варьирует в зависимости от взаимного содержания титана и железа от низких температур до 580°C при нулевом содержании титана).

Это далеко не полный перечень известных магнитных минералов в горных породах, но они наиболее часто встречаются.

Температура Кюри (T_c) - это температура, при нагревании выше которой остаточная намагниченность магнитных минералов исчезает. С другой стороны, если охлаждать магнитные минералы от высоких температур, то при прохождении температуры (точки) Кюри в них в присутствии внешнего магнитного поля возникает термоостаточная намагниченность. Выше мы уже упомянули ее при рассмотрении примера с обжигом керамических изделий в печи.

Перечислим некоторые виды остаточной намагниченности, характерные для горных пород.

1. TRM (J_{TR}) - уже известная нам термоостаточная намагниченность. Здесь и далее приводятся два обозначения видов намагниченности; первое из них (TRM) принято в зарубежной литературе, второе (J_{TR}) - в отечественной. Термоостаточная намагниченность образуется при остывании пород от температур выше точки Кюри. Термоостаточная намагниченность характерна, например, для излившихся лав, интрузий, в частности для даек или для осадочных пород, обожженных на контактах с интрузивными или эффузивными телами.

2. DRM (J_{DR}) - ориентационная намагниченность, другие ее названия - осадочная, детритная. Иногда ее подразделяют на седиментационную и постседиментационную. Эта остаточная намагниченность возникает при образовании осадочных горных пород - при осаждении частиц магнитных минералов (процесс седиментации) или при перемешивании в еще жидком осадке (постседиментационный процесс). Ориентационная намагниченность, как это из ее названия, образуется в результате ориентации магнитных частиц подобно магнитным стрелкам под воздействием земного магнитного поля.

3. CRM (J_{CR}) - химическая, или кристаллизационная, намагниченность возникает во внешнем магнитном поле при химическом изменении магнитного или первоначально немагнитного материала.

Например, при окислении в горных породах зерен магнетита до гематита вместе с исчезновением магнетита исчезает связанная с ним намагниченность и возникает химическая намагниченность гематита (происходит преобразование одного магнитного минерала в другой). Кроме того, подобного вида намагниченность (кристаллизационная остаточная намагниченность) возникает при образовании магнитных минералов из немагнитных, например, при окислении пирита до магнетита и гематита или при разложении сидерита при прогреве горных пород. Такого рода кристаллизационная намагниченность присуща, в частности, красноцветным осадочным породам (их намагниченность возникла при образовании пигмента).

4. $V_{RM} (J_{rv})$ - вязкая остаточная намагниченность. Она образуется под воздействием внешнего магнитного поля в продолжении некоторого времени. Ее характерное свойство - изменение во времени: увеличение в присутствии внешнего магнитного поля и уменьшение - при его отсутствии.

Мы рассмотрели основные виды намагниченности и их образование в горных породах, но намагниченность в горных породах можно и разрушить, например нагреванием выше температуры Кюри, воздействием переменного магнитного поля или просто помещая образцы горных пород - правда на очень длительное время - в немагнитное пространство.

Отметим, что в рассмотренных выше случаях намагниченность образуется в присутствии постоянного магнитного поля; в природе это магнитное поле Земли. Размагничивание, наоборот, происходит при отсутствии внешнего магнитного поля. Если при размагничивании, т.е. при воздействии на образец горной породы различными размагничивающими факторами (нагревы, переменное магнитное поле и др.), постоянное магнитное поле не отключать, то на существующую намагниченность (или вместо нее) наложится новая.

Намагниченность любого вида, образующаяся в горных породах, носит статистический характер. Это означает, что при образовании, например, ориентационной намагниченности каждое отдельное зерно магнитного минерала не обязательно ориентируется строго в соответствии с внешним геомагнитным полем, что связано с присутствием при образовании намагниченности, кроме ориентирующих факторов (в качестве такого фактора выступает земное магнитное поле), еще и дезориентирующих факторов, таких, например, как броуновское (тепловое) движение, подводные течения, гравитационные явления, связанные с массой и формой магнитных зерен и др.

При осреднении магнитных моментов (намагниченностей) всех магнитных частиц по объему всего образца суммарный магнитный момент (т.е. вектор намагниченности) будет приблизительно характеризовать направление внешнего магнитного поля. Направление такой результирующей суммарной намагниченности близко к

направлению геомагнитного поля в момент ее образования. Причем намагниченность разных образцов даже из одного стратиграфического уровня вследствие статистического ее характера будет иметь различающиеся направления. Такие различия могут достигать десятков градусов.

Существует важный параметр, определяющий рассеяние векторов намагниченности, - кучность векторов намагниченности K (в зарубежной литературе для обозначения кучности применяется греческая буква κ). Кучность векторов намагниченности (или, как еще говорят, палеомагнитных векторов) характеризует разброс векторов намагниченности для отдельных образцов вокруг некоторого среднего направления. Среднее направление для однокомпонентной намагниченности (например, для намагниченности, образовавшейся единовременно и, следовательно, при одном направлении земного магнитного поля) приблизительно будет совпадать с направлением геомагнитного поля.

Таблица 2.1. Разброс совокупности векторов (в градусах) для различных значений кучности

| Кучность | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 500 | 1000 | 5000 |
|----------|----|----|----|----|-----|-----|------|------|
| Разброс | 91 | 64 | 52 | 40 | 28 | 13 | 9 | 4 |

Чем больше разброс векторов, чем более рассеянное их распределение, тем меньше величина кучности. В табл. 2.1 приведен угловой диаметр конусообразной области, включающей 95% векторов намагниченности, при различных значениях кучности распределения. Так, для совокупности векторов, характеризующейся кучностью $K = 30$, основное количество векторов (95%) будет располагаться в конусе с диаметром около 50° (угол между наиболее удаленными векторами может достигать 50°).

Кучность палеомагнитных направлений на одном стратиграфическом уровне характеризует внутрипластовый разброс векторов намагниченности. Внутрипластовая кучность может достигать сотен и тысяч для магматических пород и десятков-сотен для осадочных.

Выше упоминались вековые (палеоэоковые) вариации земного магнитного поля. Наличие связанных с ними изменений направления геомагнитного поля вызывает изменение направлений намагниченности от уровня к уровню, от одного геологического пласта к другому. Кучность палеомагнитных направлений, связанная с палеоэоковыми

вариациями, отражает межпластовый разброс и ее величина составляет около 30.

Возникающая в горных породах в природных условиях намагниченность может содержать несколько разных компонент намагниченности - различных по своей природе (т.е. по виду намагниченности), времени образования, направлению и составу магнитных минералов. Такая суммарная намагниченность горных пород называется естественной остаточной намагниченностью и обозначается NRM или J_D .

По времени образования компонент намагниченности принято разделять на первичную (синхронную с образованием горной породы), вторичную (или метакронную) и современную. Различие между метакронной и современной компонентами намагниченности состоит в том, что современная компонента образовалась при современном положении геомагнитных полюсов и современной полярности земного магнитного поля. В горной породе может присутствовать несколько различных компонент метакронной намагниченности, количество которых определяется количеством и интенсивностью наблюдавшихся во время существования горной породы воздействий, например региональных прогревов или химических изменений.

В предыдущем абзаце была упомянута полярность земного магнитного поля. Что это такое? Из опыта палеомагнитных исследований известно, что магнитное поле Земли способно изменять свою полярность - северный и южный геомагнитные полюса при этом меняются местами. Это явление смены полярности земного магнитного поля носит название инверсии магнитного поля. Полярность, соответствующая современному положению геомагнитных полюсов, называется прямой, или нормальной, полярностью и обозначается латинской буквой N . Другая полярность земного магнитного поля называется обратной (она обозначается буквой R). В последнем случае северный конец магнитной стрелки был бы обращен на юг.

На протяжении последних 160 млн лет произошло около 300 инверсий геомагнитного поля. Последняя инверсия магнитного поля отмечена около 0.73 млн лет назад.

Интервалы одной полярности геомагнитного поля носят название эпох геомагнитной полярности. Самые последние из них названы в честь известных магнитологов:

- эпоха Брюнес - прямая полярность;
- эпоха Матуяма - обратная полярность;
- эпоха Гаусс - прямая полярность;
- эпоха Гильберт - обратная полярность.

Сейчас мы живем в эпоху Брюнес.

В качестве примера рассмотрим, что происходит после излияния лавы какого-нибудь гипотетического сравнительно молодого вулкана. При излиянии 1 млн лет назад (т.е. в эпоху Матуяма) образовалась

термоостаточная намагниченность обратной полярности. После этого в течение 270 тыс. лет (т.е. до инверсии геомагнитного поля Матуяма - Брюнес) образовывалась вязкая намагниченность того же знака. 730 тыс. лет назад произошла инверсия геомагнитного поля - геомагнитные полюса поменялись местами и заняли свое современное положение. Затем возникшая при обратной полярности геомагнитного поля вязкая намагниченность стала разрушаться и к нынешнему времени практически полностью исчезла; однако возникла вязкая намагниченность прямой полярности. Кроме того, при некоторых химических изменениях первичного магнитного минерала - титаномагнетита могла возникнуть химическая намагниченность. Таким образом, возникнет сложная намагниченность, состоящая из трех компонент остаточной намагниченности: первичной намагниченности обратной полярности (время образования 1 млн лет назад) и двух современных - химической и вязкой.

Возникшие три компонента намагниченности образуют сложную естественную остаточную намагниченность NRM лавы. Полярность ее зависит от величин компонент намагниченности прямой и обратной полярности, направления которых отличаются на 180° .

Ситуация еще более усложнится в случае длительной истории существования горной породы. При этом в связи с изменением направления геомагнитного поля для некоторого геологического объекта возникающие вторичные компоненты намагниченности могут быть направлены под любым неизвестным углом к направлению первичной намагниченности. В таких случаях суммарная намагниченность в горной породе будет составлять векторную сумму разнонаправленных и в общем случае различающихся по величине компонент намагниченности.

Из рассмотренного примера видно, что при палеомагнитных исследованиях приходится работать со сложной по составу, природе, времени возникновения и направлению намагниченностью.

Какие явления, кроме названной способности горных пород подобно магнитофонной ленте сохранять направление земного магнитного поля, лежат в основе палеомагнитного метода, явления, без которых невозможно было бы применение палеомагнетизма в геологических науках? Это уже упоминавшееся явление смены полярности магнитного поля Земли, а также движение континентов и литосферных плит и другие тектонические движения блоков горных пород различных размеров.

Смена полярности позволяет применять палеомагнитный метод в стратиграфии при корреляции близких по возрасту разрезов между собой, т.е. кроме обычных в стратиграфии корреляций, основанных на литологических и фаунистических признаках, для этого используются эпохи (или зоны) геомагнитной полярности.

Второе явление позволяет применять палеомагнитный метод в тектонике: по сохранившемуся в горных породах направлению

геомагнитного поля возможно установить перемещение литосферных плит (изменение их широты во времени) - см. формулу (1.1) и вращательные движения (по изменениям склонения намагниченности D). Здесь можно отметить роль палеомагнитологии в доказательстве движения материков и развитии гипотезы тектоники плит.

Эти явления составляют основу для применения палеомагнитного метода в геологии. Если бы отсутствовало одно из этих явлений, не существовало бы палеомагнитологии как науки в современном ее виде и... не было бы этой книги.

Перечислим их еще раз.

- Связь характеристик геомагнитного поля (наклонения I) с местоположением (широтой Φ).
- Фиксация направления геомагнитного поля в магнитных минералах горных пород.
- Смена полярности геомагнитного поля.
- Тектонические движения блоков земной коры.

Ученый. Очень трудно будет все это распутать, разобраться и привести в порядок так, чтобы не повредить ничему живому. В сказках все это гораздо проще.

*Е. Шеври
Тень*

Глава 2

Последовательность палеомагнитных операций

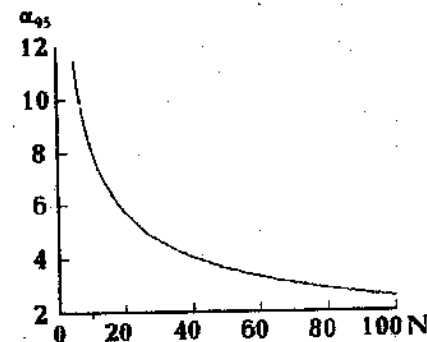
— Теперь приступим к настоящей работе. В сущности, все это не трудно, дорогая моя.

*Е. Шеври
Золушка*

В палеомагнитных исследованиях выделяются два основных направления, связанные с задачами, которые перед ними ставятся. Это стратиграфические и тектонические палеомагнитные исследования. В соответствии с этим несколько различается методика отбора и обработки палеомагнитных коллекций. Для определенности будем далее рассматривать методику, которая может применяться при тектонических палеомагнитных исследованиях.

Чтобы получить достаточно точное направление намагниченности, которое будет связываться с направлением поля центрального осевого диполя, для одного геологического объекта необходимо отобрать палеомагнитную коллекцию объемом в 20-30 штучков из разных стратиграфических уровней; по крайней мере число штучков не должно быть меньше 10. Эти цифры условны и варьируют в работах различных авторов, но они выражают сложившиеся к настоящему времени представления. При таких объемах палеомагнитных коллекций можно с некоторой долей уверенности полагать, что внутри- и межпластовый разброс будет осреднен.

Рис. 2.1. Зависимость точности в градусах определения направления совокупности векторов намагниченности от объема выборки N при кучности распределения ($K=30$)



Увеличение числа палеомагнитных штуфов не приведет к заметному улучшению точности определения направления намагниченности (см. на рис. 2.1 зависимость точности определения среднего направления совокупности палеомагнитных векторов от объема выборки N при кучности распределения $K=30$, соответствующей палеогеомагнитным вариациям геомагнитного поля).

В качестве геологического объекта может выступать дайка, несомненно потоков излившейся лавы или разрез осадочных пород одного возраста (например, какой-нибудь свиты).

Для контроля за возможным лабораторным подмагничиванием (см. ниже в этой главе) из каждого штуфа в процессе подготовительных работ выпиливается не менее двух образцов (кубиков) - их количество может меняться в большую сторону в зависимости от целей исследования.

При палеомагнитных исследованиях изучаются векторные величины, поэтому отобранные для анализа палеомагнитные образцы должны быть ориентированными. При отборе всех палеомагнитных штуфов производится замер географическим компасом положения каждого штуфа в пространстве. К таким замерам относятся измерение направления и угла падения пород для каждого опробованного стратиграфического уровня (т.е. штуфа), а также выбор на палеомагнитном штуфе ровной площадки (площадки маркировки) и измерения направления и угла ее падения. При этом на штуфе рисуются две линии, соответствующие простиранию и падению площадки маркировки. Иногда (и это характерно для осадочных пород) площадка маркировки по пространственному положению совпадает с кровлей пласта и имеет те же элементы залегания. В этом случае производится только одно измерение географическим компасом.

Ориентация палеомагнитных образцов необходима для восстановления его первоначального положения в пространстве (например, до деформаций слоев при складкообразовании). Вспомним, что для определения местонахождения завода-изготовителя керамических изделий (см. пример в главе 1) делалось предположение о том, что все фаянсовые кружки располагаются в печи вертикально, а при изучении осколка кружки, кроме того, мы запоминали его первоначальное положение.

За рубежом чаще применяют другую методику отбора и маркировки палеомагнитных образцов, когда для отбора используются портативные буровые установки, а выбираемый керн расплавляется на цилиндры. При этом маркируется верхняя образующая цилиндрического керна и вместо направления падения принято измерять азимут простирания пород.

Как быть, если геологические тела изменяли свое положение, например, в результате складкообразования? Ведь в этом случае вектор первичной намагниченности в современном его положении не будет

совпадать с направлением древнего геомагнитного поля. Для восстановления первоначального направления векторов намагниченности вводят поправку за современный наклон слоев горных пород (так называемая тектоническая коррекция). В связи с этим в палеомагнитологии существует такое понятие, как система палеомагнитных координат. Обычно различают современную (географическую) и древнюю (стратиграфическую) системы координат. Как следует из названия, направление вектора намагниченности в современной системе координат - это направление, которое он занимает в настоящее время; в древней системе координат - направление вектора намагниченности до смятия пластов в складку (рис. 2.2). При этом предполагается (и это предположение чаще всего подтверждается), что при складкообразовании породы претерпевают простое вращение, заключающееся в повороте на некоторый угол вокруг горизонтальной оси.

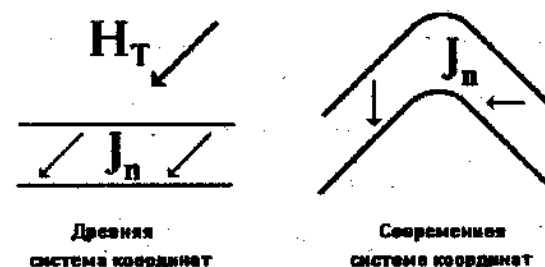


Рис. 2.2. Изменение положения вектора намагниченности после складкообразования

В палеомагнитологии применяют обе системы координат, так как заранее не известно какой возраст (либо до-, либо послескладчатый) выделенных компонент намагниченности. Если намагниченность возникла в породе до складкообразования, то для определения направления геомагнитного поля и положения палеомагнитного полюса используют векторы намагниченности в древней системе координат, в противном случае - в современной системе координат.

Существуют достаточно простые формулы, связывающие координаты вектора намагниченности в современной и древней системах координат. Для такого пересчета необходимо знать только положение оси вращения и угол вращения, а эти величины полностью определяются элементами залегания пласта.

В результате подготовительных операций (отбора ориентированных палеомагнитных штуфов и "распилки" - изготовления кубиков) мы будем иметь палеомагнитные кубики, на которых обычно надписывается

номер образца и рисуется стрелка, соответствующая направлению падения площадки маркировки (см. рис. на обложке).

Теперь, когда палеомагнитная коллекция получена, можно приступать к лабораторным исследованиям. Что в них входит и какова их цель? Цель ясна: определить направление древней (первичной) намагниченности, определить ее возраст и таким образом восстановить направление древнего геомагнитного поля для этого времени.

Естественная остаточная намагниченность в горных породах в общем случае может состоять из нескольких компонент разного возраста и направления. Эти компоненты могут различаться типом намагниченности (ориентационная, термоостаточная, химическая, вязкая и др.) и магнитным минералом, который несет эту остаточную намагниченность.

Поэтому в ходе лабораторных исследований ставится задача по возможности разделить эти компоненты и датировать. И, как понятно из неопределенности этой фразы, это не всегда выполнимо.

На чем основана возможность разделения различных компонент намагниченности? Разные виды намагниченности и разные магнитные минералы имеют естественно и разные физические свойства. Например, намагниченность, связанная с гематитом, разрушится при нагревании образца до температуры Кюри гематита, т.е. при 675°C . Для магнетита это 580°C , для титаномагнетита - температура Кюри может быть еще меньше.

Поэтому, если нагревать образцы в специальных печах, иногда возможно (часто или редко?) с применением некоторого математического аппарата определить направления разных компонент намагниченности. В чем заключается "специальность" этих печей? В том, что в них созданы условия для уменьшения земного магнитного поля лаборатории. Только в этом случае возможно постепенное ступенчатое размагничивание. Критическим параметром таких печей является остаточное магнитное поле. Идеальным было бы полное его отсутствие, т.е. полная компенсация магнитного поля лаборатории. В противном случае могут образовываться новые компоненты намагниченности в остаточном магнитном поле лаборатории (так называемое лабораторное подмагничивание образцов).

Лабораторные испытания палеомагнитных образцов, заключающиеся в воздействии на них размагничивающих факторов, называются магнитными чистками. В данном случае это температурная чистка (чистка нагревами). Возможны и другие виды магнитных чисток, например чистка переменным магнитным полем (подобно размагничиванию переменным магнитным полем экранов телевизоров), но в настоящее время наиболее часто применяется температурная магнитная чистка.

Для применения математических методов разделения компонент намагниченности необходимо достаточно много шагов ступенчатой

магнитной чистки. После каждого шага магнитной чистки измеряется направление остаточного вектора намагниченности на магнитометре.

В результате завершения этих операций палеомагнитолог будет располагать измерениями остаточной намагниченности на каждом этапе чистки в виде тройки декартовых координат x , y и z . Используя замеры пространственного положения маркировки палеомагнитных образцов и пластов горных пород (т.е. азимуты и углы их падения) декартовы координаты векторов намагниченности пересчитываются в палеомагнитные сферические координаты намагниченности (склонение, наклонение и величину вектора) в современной и древней системах координат.

Перечислим еще раз те стадии палеомагнитных исследований, которые приводят к получению палеомагнитных данных и являются по существу подготовительными.

- Отбор палеомагнитных ориентированных штуфов.
- Изготовление палеомагнитных образцов.
- Ступенчатая магнитная чистка палеомагнитных образцов в специальных печах с целью выделения различных компонент намагниченности.
- Измерения на магнитометре направления намагниченности образцов после каждого шага ступенчатой магнитной чистки.
- Так называемые магнитоминералогические исследования, которые проводятся для определения состава магнитных минералов и выяснения природы намагниченности.

-Ах, да, Золушка, моя звездочка! Ты хотела побежать в парк, постоять под королевскими окнами.

-Можно? - спрашивает девочка радостно.

-Конечно, дорогая, но прежде прибери в комнатах, вымой окна, натри пол, выбели кухню, выколи грядки, посади под окнами семь розовых кустов, познай самое себя и намели кофе на семь недель.

Е. Шард
Золушка

Глава 3

Графическое представление палеомагнитных данных

Очень длинный человек. А вот кому рассказать, что я вижу?

Е. Шеври
Тень

Рассмотрим способы графического изображения результатов палеомагнитных исследований, в частности магнитных чисток.

Как отмечалось в предыдущей главе, при измерении намагниченности на магнитометре получают компоненты вектора намагниченности в декартовых координатах, т.е. величины x , y и z . Эти ортогональные координаты векторов намагниченности затем пересчитываются в сферические координаты, примерно такие же, как географические координаты, определяющие положение точки на земной поверхности. Сферические координаты вектора намагниченности подобно элементам земного магнетизма (см. рис. 1.2) также определяются тремя величинами: склонением (D), наклонением (I) и величиной вектора (R).

Как правило, при тектонической и стратиграфической интерпретации палеомагнитных данных используются только склонение и наклонение. Склонение намагниченности может принимать значения от 0 до 360° , наклонение - от -90 до 90° .

Склонение - это направление горизонтальной составляющей вектора намагниченности. Например, величины склонения 0 (360), 90 , 180 и 270° указывают, что проекция вектора на горизонтальную плоскость обращена на север, восток, юг и запад соответственно. Наклонение вектора намагниченности определяет наклон вектора намагниченности к горизонту, т.е. представляет собой угол между этим вектором и горизонтальной плоскостью. Считается, что если вектор намагниченности направлен вниз, то наклонение (знак наклонения) положительно. Например, наклонение, равное -90 , 90° и 0 , указывает, что вектор намагниченности соответственно направлен вертикально вверх, вертикально вниз или горизонтален.

Отметим, что направления векторов, задаваемых, например, следующими значениями склонения и наклонения: $D=30$, $I=90$ и $D=90$, $I=90$, определяют один и тот же вектор намагниченности - этот вектор направлен вертикально вниз (величина склонения в этом случае не имеет смысла). Такие значения склонений и наклонений могут возникать при осреднении почти вертикально направленных векторов намагниченности при компьютерной обработке.

В палеомагнитных исследованиях широко применяются два вида представления векторных данных. Это ортогональные диаграммы Зийдервельда и стереограммы. Графические изображения такого рода очень часто встречаются в палеомагнитных статьях.

Диаграмма Зийдервельда используется для изображения векторов намагниченности в декартовых координатах, стереограмма - в сферических. В первом случае отражаются все три декартовы координаты вектора намагниченности, во втором - только две сферические координаты: склонение и наклонение.

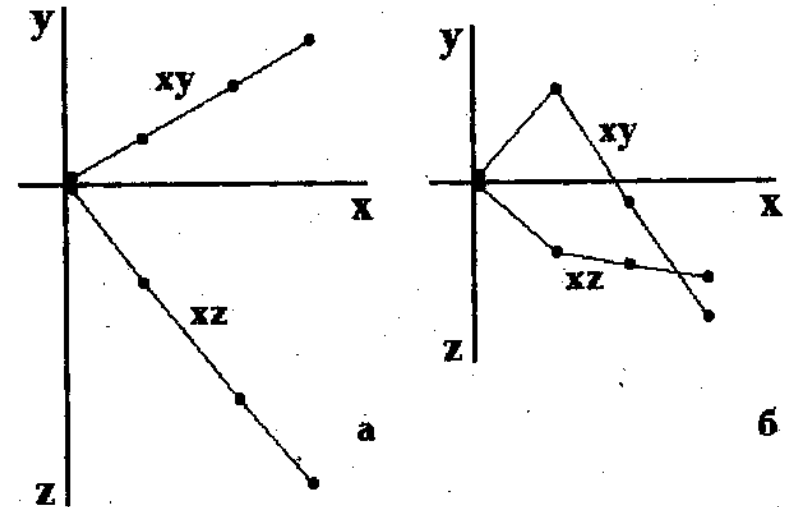


Рис. 3.1. Диаграмма Зийдервельда результатов магнитной чистки однокомпонентной (а) и двухкомпонентной (б) намагниченности

Изображение на диаграмме Зийдервельда представляет собой изображение вектора намагниченности в проекции на две ортогональные плоскости, которые располагаются на одном рисунке, например плоскости xy и xz на рис. 3.1. При этом одному вектору намагниченности соответствуют две точки на диаграмме Зийдервельда (по одной точке на каждой плоскости). При изображении результатов

магнитной чистки одного палеомагнитного образца на диаграмме Эйндервейлда каждая плоскость будет представлена совокупностью точек. Последовательные точки соединяются линиями, и рядом с каждой точкой может быть обозначена величина размагничивающего воздействия, например температура прогрева.

Стереограмма представляет собой проекцию сферы на плоскость. Различают полярную и экваториальную проекции.

Полярная проекция, представленная на рис. 3.2, аналогична распространенным изображениям полярных областей земного шара (Арктики и Антарктики). Иными словами, это вид на северное или южное полушарие с нарисованными на нем меридианами и параллелями из центра сферы. Экваториальная проекция подобна обычному изображению двух земных полушарий (западного и восточного).

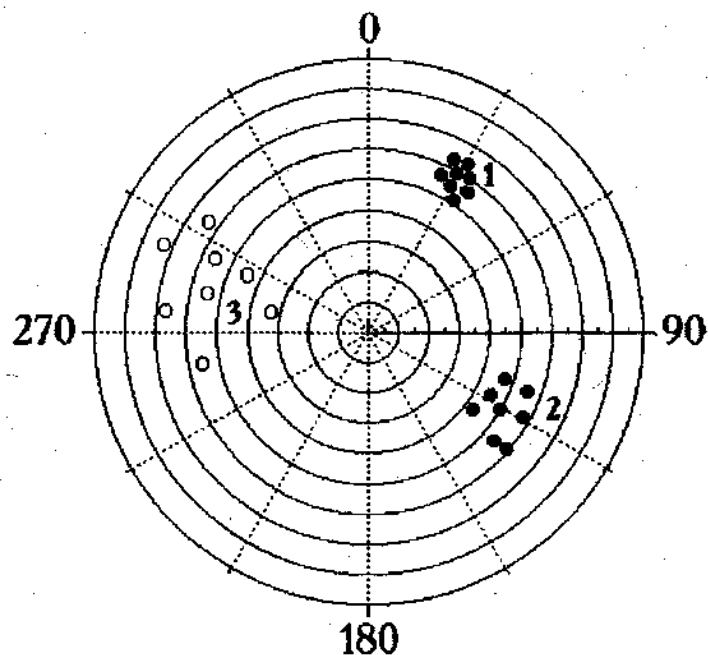


Рис. 3.2. Примеры распределений палеомагнитных векторов с различной кучностью на равнопромежуточной полярной проекции. 1, 2, 3 - кучность векторов 200, 50 и 30 соответственно

Кроме того, каждая из проекций может быть равнопромежуточной, равноплощадной или равноугольной (в зависимости от того, что

сохраняется неизменным при перемещении по поверхности шара сферического треугольника - расстояние, площадь или углы).

Следует упомянуть некоторые иногда используемые на сфере элементы изображений. Сферический треугольник - это треугольник, образованный дугами большого круга. Большой круг, или проекция большого круга на сферу, подобно обычным меридианам, представляет собой проекцию плоскости, проходящую через центр сферы. Малый круг, или проекция малого круга на сферу, как и широты на глобусе, также является плоскостью, но не обязательно проходящей через центр сферы. Большой круг - это частный случай малого, как и земной экватор на глобусе.

Для изображения векторов намагниченности можно использовать любую из упомянутых выше проекций. В палеомагнитных статьях чаще применяют полярную проекцию, на которой линии равных склонений изображаются в виде радиусов, а линии равных наклонений - в виде концентрических окружностей. Для изображения палеомагнитных полюсов используют экваториальную и другие виды проекций.

Все векторы, изображаемые на стереограммах, имеют единичную длину. Так даже и говорят: векторы на единичной сфере (начало каждого вектора при этом расположено в центре сферы). Обычно векторы намагниченности, наклонение которых положительно, изображают на стереограммах в виде закрашенных кружков, векторы с отрицательным наклонением - незакрашенных кружков (см. рис. 3.2). В табл. 3.1 представлены основные характеристики распределений векторов намагниченности, изображенных на стереограмме рис. 3.2.

Таблица 3.1. Основные характеристики распределений векторов намагниченности, изображенных на рис. 3.2

| Номер распределения | Среднее направление | | Кучность, К |
|---------------------|---------------------|---------------|-------------|
| | Склонение, D | Наклонение, I | |
| 1 | 30 | 30 | 200 |
| 2 | 120 | 40 | 50 |
| 3 | 285 | -45 | 30 |

Рассмотрим графическое представление результатов магнитной чистки для случаев разного количества компонент намагниченности.

1. Однокомпонентная намагниченность. На диаграмме Эйндервейлда, показывающей разрушение вектора намагниченности в процессе магнитной чистки, в этом случае в каждой плоскости будет наблюдаться приблизительно прямая линия (возможно, осложненная ошибками измерений), проходящая через начало координат при полном

разрушению вектора намагниченности при температуре Кюри. На стереограмме этому соответствуют одна или несколько близко расположенных точек (см. рис. 3.1, а и 3.3, а).

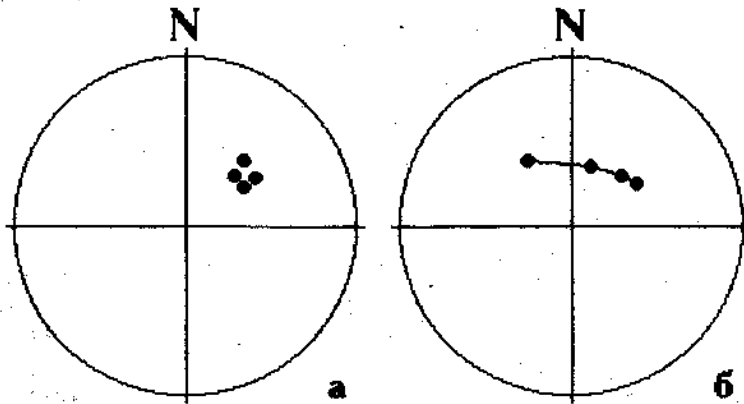


Рис. 3.3. Стереограмма результатов магнитной чистки однокомпонентной (а) и двухкомпонентной (б) намагниченности

2. Двухкомпонентная намагниченность. Если в ходе магнитной чистки разрушается сначала одна компонента, а затем другая, то на диаграмме Зейдервельда (в каждой плоскости) будут наблюдаться две последовательные прямые линии, которые определяют направление последовательно разрушаемых в процессе магнитной чистки компонент намагниченности. Вторая из них будет проходить через начало координат (см. рис. 3.1, б). На стереограмме в этом случае векторы намагниченности, измеренные после каждого этапа ступенчатой магнитной чистки, будут располагаться на большом круге (см. рис. 3.3, б). Это происходит потому, что два любых вектора и их сумма располагаются в одной плоскости.

Ситуация усложнится, если разрушение компонент намагниченности происходит одновременно. Большой круг на стереограмме останется (возможно изменится его протяженность), а на диаграмме Зейдервельда прямые могут трансформироваться - возникнут криволинейные участки, протяженность которых может занимать весь интервал размагничивающих воздействий. При полной идентичности свойств компонент намагниченности к размагничивающим воздействиям картина будет подобна случаю разрушения однокомпонентной намагниченности, но это будет кажущаяся однокомпонентность. В этом случае разделение компонент намагниченности невозможно.

3. Три компоненты и более. Этот случай сводится к предыдущему. Если происходит поочередное разрушение различных компонент намагниченности, то на диаграмме Зейдервельда возникнут последовательные прямые, характеризующие направления последовательно разрушаемых в процессе магнитной чистки компонент намагниченности. В противном случае наблюдаемая картина может оказаться значительно запутанней. Следует иметь в виду, что такие случаи возможны, и тогда требуется довольно кропотливая работа по выделению этих компонент намагниченности и определению их направления.

Ученый. Мне казалось, что еще миг - и я все пойму, а теперь мне кажется, еще миг - и я совсем запутаюсь.

Е. Шеври
Тень

Глава 4

Выделение компонент намагниченности

Дон-Кихот. Школьник, решая задачу, делает множество ошибок. Напишет, сотрет, опять напишет, пока не получит правильный ответ.

Е. Шарф
Дон-Кихот

В результате лабораторных исследований, заключающихся в проведении ступенчатых магнитных чисток (нагревами или переменным магнитным полем), палеомагнитолог получает измерения намагниченности для каждого этапа чистки. Таким образом, для каждого палеомагнитного образца имеются значения намагниченности в декартовых (x, y, z) или сферических (D, I, R) координатах. Эти данные представляют собой основу для выделения компонент одним из методов так называемого компонентного анализа и, следовательно, для всех дальнейших исследований - как собственно палеомагнитных, так и в геологических приложениях.

В предыдущей главе рассматривались способы графического представления палеомагнитных данных и, в частности, результатов магнитных чисток. Иногда говорят, что та или иная компонента намагниченности выделена с помощью (или с использованием) диаграмм Зидерверльда или стереограмм. Это не совсем так. Сейчас для этого применяют численные методы и используют компьютеры. Графическое представление играет вспомогательную роль, хотя иногда, при сложном компонентном составе исходной намагниченности, эта роль довольно значительна.

Компонентный анализ основан на различиях физических свойств различных компонент намагниченности к размагничивающим воздействиям. Только в этом случае возможно (но не всегда) разделение компонент намагниченности. Если таких различий нет, то наблюдается упоминавшаяся выше кажущаяся однокомпонентность, и направление, полученное для такого вектора, представляет собой некоторую векторную сумму разновозрастных и разнонаправленных компонент (в зависимости от вклада той или иной компоненты) и не отражает реального направления геомагнитного поля.

В зависимости от сложности компонентного состава намагниченности (см. предыдущую главу) применяются разные методы выделения компонент (компонентного анализа). В порядке возрастания сложности NRM используются следующие методы.

1. Однокомпонентная намагниченность. На стереограмме векторы не меняют своего направления в ходе чистки; на диаграмме Зидерверльда видна одна приблизительно прямая линия, спадающая по мере разрушения вектора намагниченности в начало координат.

В этом случае можно:

- вычислить аппроксимирующую прямую и определить для нее направление;
- вычислить среднее направление для намагниченности на разных этапах чистки;
- выбрать практически любую величину размагничивающего воздействия и определить для нее направление намагниченности; в силу однокомпонентности намагниченности это направление будет не сильно отличаться от оценок, полученных первыми двумя способами.

2. Две и более компоненты намагниченности. При последовательном разрушении различных компонент намагниченности в процессе магнитной чистки можно:

- вычислить аппроксимирующие прямые для всех прямолинейных участков и определить для них направления;
- вычислить среднее направление для наиболее стабильной компоненты намагниченности (например, высокотемпературной) по измеренным векторам на разных этапах чистки для конечного (однокомпонентного) участка;
- вычислить средние направления для менее стабильных компонент намагниченности по разностным векторам (разрушаемым в процессе магнитной чистки векторам) для каждого прямолинейного участка.

При близких физических свойствах различных компонент намагниченности по отношению к разрушающим воздействиям в некоторых случаях (для двухкомпонентной намагниченности) можно воспользоваться так называемым методом пересечения кругов перемагничивания (этот метод использует результаты магнитных чисток совокупности палеомагнитных образцов с различающимися элементами залегания пластов). Этот способ позволяет определить направление наиболее кучной компоненты намагниченности, но оценки, получаемые методом пересечения кругов перемагничивания смещены относительно истинных направлений. Необходимо учитывать величину возможных при этом систематических ошибок.

С помощью компонентного анализа получают направления компонент намагниченности для каждого палеомагнитного образца (или для нескольких образцов при использовании метода пересечения кругов перемагничивания). Эти компоненты могут быть выделены для разных интервалов размагничивающих воздействий и могут различаться по

направлению. Поэтому для дальнейшей обработки направления выделенных по разным образцам компонент намагниченности группируются, например в одной группе могут оказаться компоненты намагниченности из одного интервала размагничивающих воздействий или близкие по направлению компоненты.

Каковы дальнейшие процедуры?

Во-первых, могут быть вычислены средние направления для каждой группы компонент для всей палеомагнитной коллекции из одного геологического объекта. При этом осредняется внутри- и межпластовый разброс палеомагнитных векторов, связанный, например, с палеогеомагнитными вариациями, ошибками измерений или другими причинами. Кроме того вычисляют кучность распределения выделенных компонентным анализом векторов и радиус круга доверия для среднего направления каждой компоненты (α_{95}), характеризующий точность полученного среднего направления. Строго говоря, радиус круга доверия определяет ту область вокруг вычисленного среднего направления компоненты намагниченности, в которой с вероятностью 95% находится ее истинное направление.

Во-вторых, могут быть вычислены координаты палеомагнитного полюса и овал доверия для него, который аналогичен по смыслу кругу доверия для среднего направления намагниченности.

Таким образом, в результате компонентного анализа данных магнитной чистки одной палеомагнитной коллекции могут быть получены направления одной или более компонент естественной остаточной намагниченности NRM. Но для выделенных компонент пока еще не определен возраст (т.е. время их образования). Возраст той или иной компоненты намагниченности может отличаться от возраста самой горной породы. Датирование намагниченности обычно производится по отношению к времени какого-либо геологического события, например времени складкообразования, времени переотложения пород в виде конгломератов или времени внедрения дайки, и осуществляется с помощью одного из так называемых полевых тестов (тест складки, тест галек, тест контакта соответственно), рассмотрение которых будет затронут в следующей главе.

Альтернативный (и чаще всего неправильный) путь - получение и интерпретация направлений намагниченности после какого-либо шага магнитной чистки, например после прогрева палеомагнитной коллекции до температуры 500° С. При этом в общем случае оставшаяся после прогрева намагниченность может содержать несколько компонент.

Поэтому следует правильно оценивать и различать представление данных в палеомагнитных статьях. Рассмотрим три различных описания результатов магнитных чисток.

1. С помощью температурной чистки до 400° С в изученных образцах этой толщи была выделена компонента намагниченности, направление которой с высокой точностью совпало со средним

направлением, полученным для ... плиты.

2. Для всех образцов проведена детальная термочистка от 0 до 600° С. По данным чистки проведен компонентный анализ [Kirschvink, 1980].

3. От 2-х до 4-х образцов из каждого штуфа прошли ступенчатую температурную магнитную чистку вплоть до 600° С. Компонентный анализ диаграмм Зейдервельда проводился с помощью компьютерной программы [Torgvik, 1987]. Направления компоненты намагниченности, выделенной на интервале температур $T=220\div300^\circ\text{C}$, хаотичны и, вероятно, связаны с некоторой намагниченностью, являющейся суммой современной, лабораторной и древней компонент. Поведение векторов намагниченности во время магнитной чистки выше $T=250\div400^\circ\text{C}$ позволяет сделать вывод об однокомпонентности намагниченности на этом высокотемпературном интервале.

В первой статье остается невыясненным, проводил ли исследователь компонентный анализ или использовал при вычислении среднего вектора результирующие после прогрева до 400° С векторы намагниченности. Кроме того, в статье не приведены графические материалы (примеры диаграмм Зейдервельда и стереограмм), поэтому у читателя отсутствует возможность оценить не только качество палеомагнитного результата, но и разобраться в методике проведения лабораторных исследований.

Во второй статье можно увидеть, что магнитная чистка проведена до температуры Кюри магнетита. Применен компонентный анализ и дана ссылка на источник. К сожалению, графические данные, иллюстрирующие результаты магнитной чистки, отсутствуют. Не сказано о количестве выделенных компонент намагниченности и не ясно, какой из методов компонентного анализа использован - в статье, на которую исследователь ссылается, их несколько. Поэтому приходится либо верить автору на слово, либо, если полученный результат расходится с точкой зрения читателя, считать рассмотренные данные недостаточно обоснованными.

В третьей статье приведены примеры диаграмм Зейдервельда для каждой отобранной точки, что дает возможность оценить правдивость слов о компонентном составе изучаемой намагниченности. Охарактеризована каждая компонента намагниченности (низко- и высокотемпературная), и ссылкой на программу для компьютера указан конкретный метод компонентного анализа.

Шарлемань. Я научился думать, господин президент, это само по себе мучительно...

Е. Шевру
Дракон

Глава 5

Датирование компонент намагниченности

Ученый. Знаете, вечером, да еще сняв очки, я готов в это верить. Но утром, выйдя из дому, я вижу совсем другое.

Е. Шевру
Тень

Проверка гипотез (или тестирование), одна из сторон общей задачи принятия решений, и она может применяться всегда, когда в ходе исследования рождается нечто вроде гипотезы или предположения и у исследователя возникает желание это нечто проверить.

Существуют три теста, значение которых для палеомагнитологии трудно переоценить. Это так называемые полевые тесты, предназначенные для оценки возраста выделенных компонент намагниченности. Датирование проводится по отношению к времени какого-нибудь геологического события, например складкообразования, перестроения пород в виде конгломератов или внедрения интрузии, и осуществляется с помощью одного из тестов (тест складки, тест галек и тест контакта).

Основой для проверок гипотез служит хорошо известный принцип в аристотелевой логике - если из высказывания (или события) **A** следует **B**, и если **B** не выполняется, то не верно и **A**.

Например, если полученные направления намагниченности для двух разновозрастных геологических объектов первичны (событие **A**), то они должны совпадать (событие **B**). Если же эти два направления различаются (событие **B** не выполняется), то, следовательно, неверно и **A** (например, хотя бы одна из сравниваемых компонент намагниченности не первична или геологические объекты не разновозрастны). С другой стороны, если действительно полученные направления совпадают, то это не обязательно означает, что справедливо высказывание **A**. Это могло случиться, например, и при общем перемагничивании горных пород.

Такая интерпретация результатов тестирования базируется на общем принципе, гласящем, что предположение должно быть отвергнуто, если имеется противоречащий ему пример, но не обязательно должно быть принято, если такого примера найти не удалось. Если результат

тестирования не позволяет отвергнуть выдвинутое предположение, то в него обычно верят до тех пор, пока новые факты не заставят исследователя изменить свое мнение.

Каждый палеомагнитный тест используется для проверки нескольких геологических и геофизических предположений (в рассмотренном выше примере присутствуют два предположения - о первичности компонент намагниченности и о разновозрастности изучаемых горных пород). На основе этих предположений формулируется так называемая нулевая гипотеза H_0 (два направления намагниченности совпадают), которая может быть проверена с помощью процедуры проверки статистических гипотез. Для тестирования выбирается некоторая числовая величина - статистика критерия (в данном случае статистикой может быть угловое расстояние между двумя направлениями намагниченности), поведение которой (т.е. ее возможные значения) известно при условии выполнения нулевой гипотезы. Если полученная в результате тестирования статистика не согласуется с предполагаемым ее распределением, то делается вывод о несоответствии палеомагнитных данных проверяемой гипотезе и она должна быть отвергнута.

Тест складки

При возникновении первичной намагниченности в горизонтально залегающих осадочных горных породах все векторы намагниченности будут приблизительно совпадать. Если в последующем пласты пород в результате складкообразования изменяли свое положение, то соответствующие изменения произойдут и с векторами намагниченности. Таким образом, для первичной (доскладчатой) намагниченности палеомагнитные векторы должны совпадать в древней системе координат, но будут различаться в современной системе.

Если же намагниченность в горных породах целиком образовалась после складкообразования, то приблизительная параллельность векторов намагниченности должна наблюдаться в современной системе координат; в древней системе координат направления векторов намагниченности будут различаться между собой и зависеть от элементов залегания пластов.

На рис. 5.1 приведена иллюстрация такой принципиальной возможности оценки времени возникновения намагниченности по отношению к складкообразованию. Намагниченность нижнего пласта доскладчатая. Она образовалась до смятия пластов в складку: направления намагниченности совпадают в древней и различаются в современной системе координат. Возраст намагниченности верхнего пласта, наоборот, послескладчатый: направления совпадают в современной системе координат и различаются в древней.

Ценность вывода о доскладчатости намагниченности зависит от того, насколько время складкообразования отстоит от времени образования

пород. Так, если обследованы конседиментационные складки, то доскладчатость намагнитченности практически означает ее первичность. Наоборот, если складчатость, например, альпийская, а породы нижнепалеозойские, то для возраста доскладчатой намагнитченности будет получена только верхняя оценка (намагнитченность возникла не позднее альпийского времени).



Рис. 5.1. Расположение векторов доскладчатой (нижний слой) и послескладчатой (верхний слой) намагнитченности в древней и современной системах координат

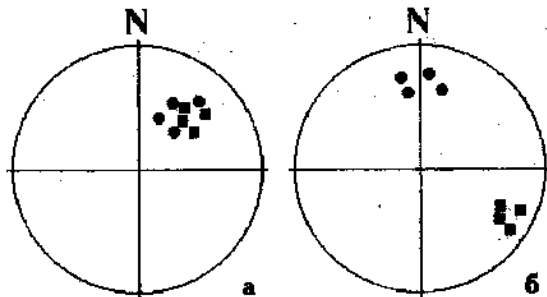


Рис. 5.2. Распределение векторов доскладчатой намагнитченности в древней (а) и современной (б) системах координат. Кругами и квадратиками обозначены направления для двух крыльев складки

Существуют различные модификации теста складки. Все они основаны на одновременном выполнении следующих геологических и геофизических предположений.

- Считается известным первичное положение смятых в складку слоев, и оно чаще всего полагается горизонтальным.
- При деформации слои поворачивались как твердые тела вокруг горизонтальной оси вращения.

- Намагнитченность пород однокомпонентна и целиком образовалась либо до, либо после деформации.

В случае выполнения всех этих предположений палеомагнитные направления в одной из систем координат (древней либо современной) будут совпадать и не зависеть от залеганий пластов. Если направления намагнитченности совпадают в древней системе координат, то намагнитченность доскладчатая; если они совпадают в современной системе координат, то намагнитченность послескладчатая.

На рис. 5.2 представлено распределение векторов намагнитченности для двух крыльев складки в древней и современной системах координат для случая доскладчатой намагнитченности. Распределения векторов в древней системе координат (рис. 5.2, а) для двух крыльев складки сильно перекрываются, а их средние направления статистически совпадают. В современной системе координат (рис. 5.2, б) распределения векторов намагнитченности для крыльев складки не совпадают и их средние направления различаются значительно.

Две корректные модификации теста складки основаны на сравнении средних направлений намагнитченности (например, для крыльев складки - тест сравнения средних направлений) или на выявлении зависимости (корреляции) распределений векторов намагнитченности от элементов залегания. Эти модификации теста складки выполняются как в древней, так и в современной системах координат.

При выполнении корреляционного теста складки исследуется корреляция между направлениями намагнитченности в разных системах координат и нормальными к пластам. Если намагнитченность доскладчатая, то корреляция будет заметна только в современной системе координат. На рис. 5.3 приводится пример для частного случая при совпадении азимута падения пластов и склонения намагнитченности - здесь зависимость или корреляция между векторами намагнитченности и элементами залегания слоев выражается в корреляции наклона намагнитченности и угла падения пластов. Возможна следующая интерпретация результатов применения двух рассмотренных модификаций теста складки.

1. Средние векторы намагнитченности различаются (выявлена корреляция между направлениями намагнитченности и нормальными к пластам) только в современной системе координат - установлена только доскладчатая намагнитченность.
2. Средние векторы намагнитченности различаются (выявлена корреляция между направлениями намагнитченности и нормальными к пластам) только в древней системе координат - установлена только послескладчатая намагнитченность.
3. Средние векторы намагнитченности различаются (выявлена корреляция между направлениями намагнитченности и нормальными к пластам) в обеих системах координат - намагнитченность является суммой до- и послескладчатой компонент. Возможна также

интерпретация этого результата как присутствие синскладчатой намагниченности, т.е. намагниченности, образовавшейся на некоторой промежуточной стадии складкообразования.

4. В обеих системах координат средние векторы не различаются (корреляция не установлена). В этом случае результат тестирования не определен - недостаточны вариации в элементах залегания пластов и/или недостаточен объем изученной палеомагнитной коллекции.

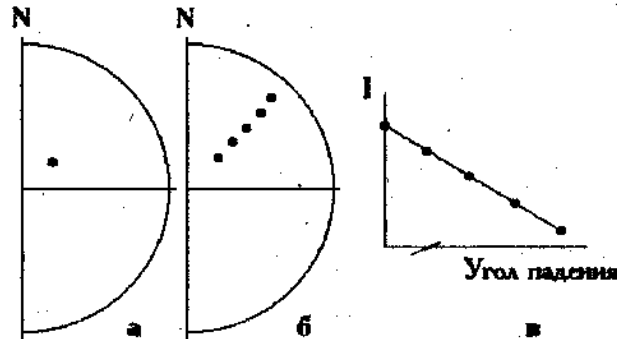


Рис. 5.3. Иллюстрация зависимости направления намагниченности (наклонения I) от элементов залегания (угла падения) слоев в современной системе координат для доскладчатой намагниченности
а - распределение векторов в древней системе координат (все векторы совпадают между собой); б - распределение векторов в современной системе координат для случая совпадения азимута падения пластов и склонения намагниченности; в - график зависимости наклонения намагниченности от угла падения слоев

В случае, когда средние направления признаны различающимися или установлена корреляция между направлениями намагниченности и элементами залегания пластов в какой-нибудь из систем координат - вероятность правильности такого вывода определена и равняется 95% (эта величина, называемая уровнем значимости, выбирается исследователем до проведения тестирования). В противном случае, когда различие признано незначимым или корреляция не установлена, вероятность правильности вывода не известна.

Это важно для интерпретации первых двух пунктов (см. выше). Например, если векторы намагниченности совпадают в древней и различаются в современной системе координат (см. пункт 1), то вероятность правильности вывода о присутствии в рассматриваемой намагниченности доскладчатой компоненты составляет 95%; вероятность вывода об отсутствии послескладчатой компоненты неопределенна.

Существует еще одна очень часто применяемая модификация теста складки - так называемый тест выравнивания, основанный на сравнении кучностей распределений намагниченности в древней и современной системах координат. Если кучность в древней системе координат значительно превышает кучность векторов намагниченности в современной системе координат, то делается вывод о том, что доскладчатая намагниченность преобладает. Поскольку установить преобладание до- или послескладчатой намагниченности явно недостаточно для датирования намагниченности, то использование этой модификации вызывает большие сомнения. В дополнении к этому существует ряд математических некорректностей, связанных с этим тестом. Таким образом, можно заключить, что тест выравнивания некорректен, и делаемые на его основе выводы о возрасте намагниченности не обоснованы, поэтому использование его для датирования намагниченности неправомерно.

Тест галек

Если в горных породах имеется только первичная намагниченность, то в результате переотложения этих пород в виде конгломератов векторы намагниченности расположатся в пространстве хаотично (кучность распределения векторов намагниченности будет близка к нулю) в силу хаотичности расположения галек в конгломератах. С другой стороны, если намагниченность галек - сумма первичной намагниченности и вторичной, образовавшейся после переотложения пород в виде конгломератов, то распределение направлений намагниченности носит более закономерный характер (на хаотичное распределение первичной намагниченности галек наложится вторичная намагниченность с некоторой конечной кучностью). Кучность распределения суммарной намагниченности будет отличаться от нуля.

Этот факт может быть использован для определения возраста образования намагниченности по отношению к времени переотложения горных пород в виде конгломератов. Если кучность распределения исследуемой намагниченности в гальках равна нулю (статистически незначимо отличается от нуля), то намагниченность образовалась до переотложения пород в виде конгломератов. Но если кучность не равна нулю, то в изучаемой намагниченности присутствует также и вторичная компонента. Вывод о додеформационном возрасте намагниченности в гальках можно распространить на эти же породы в коренном залегании и считать выделенные компоненты намагниченности коренных пород додеформационными.

Проверяемая гипотеза в тесте галек - кучность распределения векторов галек в современной системе координат равна нулю. Этот достаточно строгий с точки зрения математики тест, к сожалению, мало чувствителен к присутствию вторичной намагниченности. На рис. 5.4

представлена номограмма, характеризующая вероятность обнаружения вторичной компоненты намагниченности в зависимости от объема палеомагнитной коллекции и величины подмагничивания, т.е. от соотношения величин вторичной и первичной компонент намагниченности.

Например, если для коллекции, состоящей из 10 галек, тест дает положительный результат (нулевая гипотеза о первичности намагниченности принимается), то вероятность обнаружения вторичной (последодеформационной) компоненты намагниченности может варьировать от 80 до 20% в зависимости от степени перемагничивания. Уверенно может быть установлена вторичная компонента намагниченности при ее величине, соизмеримой с величиной первичной (додеформационной) компоненты.

На рис. 5.5 представлены графики угловой ошибки в определении вектора первичной намагниченности в зависимости от процентного содержания вторичной компоненты намагниченности и угла между направлениями первичной и вторичной компонент.

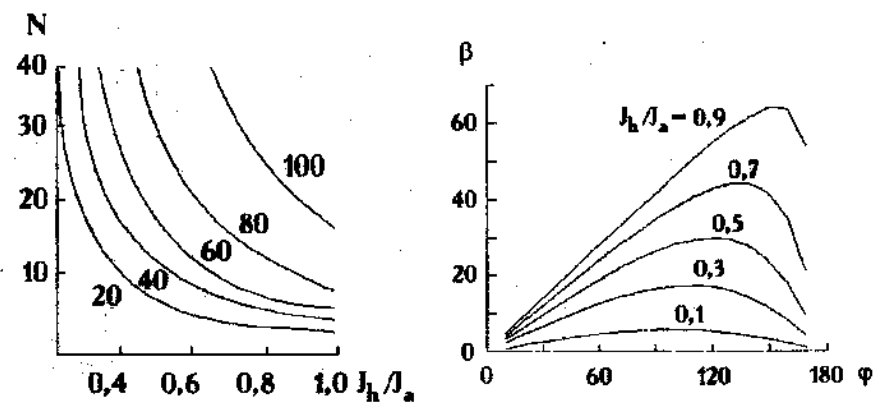


Рис. 5.4. Зависимость вероятности обнаружения вторичной компоненты тестом галек от объема коллекции (N) и отношения величин вторичной и первичной компонент J_b/J_a

Рис. 5.5. Зависимость угловой ошибки β в определении вектора первичной намагниченности от отношения величин вторичной и первичной компонент намагниченности J_b/J_a и угла ϕ между направлениями первичной и вторичной компонент

Используя номограммы на рис. 5.4 и 5.5, можно оценить необходимый объем коллекции и достоверность результата тестирования. Например, для того чтобы определить направление

намагниченности с угловой ошибкой меньше 30° , тестируемая намагниченность не должна содержать вторичную компоненту большую чем 50% от величины первичной компоненты (см. рис. 5.5). В этом случае для достаточно уверенного обнаружения вторичной компоненты (с вероятностью, например 80%) необходима коллекция объемом 30 галек (см. рис. 5.4).

С другой стороны, если отобрана коллекция объемом 20 галек и результат тестирования положителен (нулевая гипотеза принимается), то при возможном пропущенном процентном содержании вторичной компоненты 40 и 60% (и соответствующих возможных угловых ошибках в определении направления вектора первичной намагниченности около 25 и 35°) вероятность правильности делаемого вывода о первичности намагниченности составляет соответственно 40 и 70%.

Таким образом, можно сделать вывод о малой чувствительности теста галек к обнаружению вторичных компонент намагниченности. Чаще всего результат тестирования положителен, но делаемый при этом вывод маловероятен. Поэтому использовать для доказательства первичности исследуемой намагниченности результаты теста галек следует с осторожностью, необходима проверка достоверности результата по номограммам (рис. 5.4 и 5.5).

Тест контакта

При внедрении интрузивных тел на границе раздела с вмещающими породами возникает зона контакта. При этом близлежащие вмещающие породы (так называемый экзоконтакт) нагреваются до температуры выше температуры Кюри природных магнитных минералов, что приводит к их полному перемагничиванию с образованием термоостаточной намагниченности в геомагнитном поле, соответствующем времени внедрения интрузии.

Если намагниченность вмещающих пород первична и она сохранилась, то ее направление не будет совпадать с направлением намагниченности интрузии и экзоконтакта (рис. 5.6, а). В случае полного перемагничивания вмещающих пород во время внедрения интрузии направление намагниченности вмещающих пород будет совпадать с направлением намагниченности интрузии (рис. 5.6, б). Кроме того, совпадающие направления намагниченности интрузии и экзоконтакта свидетельствуют о первичности намагниченности пород интрузии. Так можно проинтерпретировать представленную на рис. 5.6 картину.

К сожалению, такая интерпретация не единственна. Намагниченность вмещающих пород (рис. 5.6, а) может оказаться суммой первичной намагниченности и вторичной, возникшей во время внедрения интрузии, а данные, представленные на рис. 5.6, б, могут означать полное перемагничивание всех изученных пород.

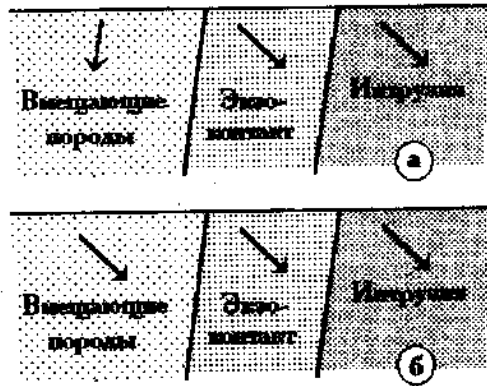


Рис. 5.6. Пример взаимоотношения направлений намагниченности интрузии и вмещающих пород для первичной (а) и вторичной (б) намагниченности вмещающих пород

Иногда все-таки можно, исследуя поведение различных магнитных параметров относительно контакта, различить эти случаи и прийти к более однозначной интерпретации.

Тест обращения

Тест обращения, вообще говоря, не является тестом, оценивающим, как предыдущие три теста, возраст намагниченности по отношению к некоторому геологическому событию. Однако с его помощью можно установить наличие или отсутствие вторичной компоненты намагниченности.

Если в изученном разрезе в результате смены знака геомагнитного поля присутствуют прямо- и обратномагнитные породы, то средние направления такой первичной намагниченности J_a для прямо- и обратномагнитных частей разреза при достаточном осреднении межпластового разброса должны быть противоположно направленными (различаться на 180°). Если в более позднее время на первичную разнополярную намагниченность наложилась некоторая вторичная намагниченность другого направления J_b , то угол между средними направлениями для разнополярных частей разреза J_n будет меньше 180° (рис. 5.7). Таким образом, тест обращения может использоваться для оценки чистоты выделенной намагниченности.

Процедура проведения теста обращения заключается в обращении векторов намагниченности одной из полярностей и в сравнении получающихся средних векторов. Если средние направления различаются незначимо, то гипотеза о первичности намагниченности

принимается, при значимом различии делается вывод о присутствии вторичной компоненты.

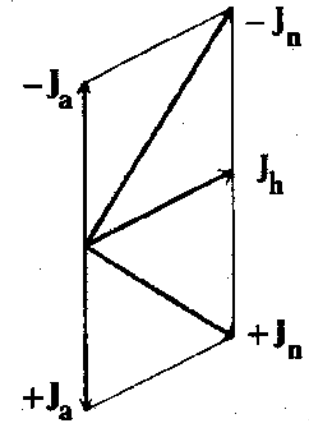


Рис. 5.7. Схема возникновения угловых ошибок при подмагничивании вторичной компонентой намагниченности J_b первичной равнополярной компоненты J_a

Существует способ снизить ошибки в определении направления первичной намагниченности (так называемый метод обращения) для случая, когда результат тестирования отрицательный. При выполнении этого способа векторы намагниченности одной из полярностей обращаются, затем для всей совокупности векторов определяется среднее направление. К сожалению, оценки направления первичной намагниченности, полученные этим методом, всегда смещены от истинного направления, и величина угловой ошибки в определении направления первичной компоненты намагниченности зависит от величины процентного соотношения первичной и вторичной компонент намагниченности по разрезу.

Первый министр. Вы меня не дослушали. Я хотел сказать: я не верю в чудеса...

Е. Шару
Голый король

Глава 6

Палеомагнетизм и тектоника

Сказочник. Кроме того, мы попадем в вечные льды, поэтому я надел свитер.

Е. Шварц
Снежная королева

Везде в этой главе и в следующей будет предполагаться, что каким-либо путем получены датированные компоненты намагниченности. Следует однако учитывать, что эти две важные процедуры палеомагнитного анализа (выделение и датирование компонент намагниченности) относятся к самым уязвимым местам любых палеомагнитных исследований. Ведь насколько точно выделены компоненты намагниченности и насколько точно они датированы, настолько точно и убедительно будет следствие - геологическая интерпретация палеомагнитных данных.

На чем основано применение палеомагнетизма в тектонике? Тектонические приложения палеомагнетизма используют все четыре явления, которые перечислены в конце 1-й главы.

С помощью палеомагнитного метода возможно, как правило, обнаружение горизонтальных перемещений геологических тел. Все горизонтальные движения, происходящие на поверхности Земли, являются вращениями. И для вращений (или поворотов) важно знать, относительно какой точки на земной сфере (или вокруг какой оси) произошел поворот и его масштаб, т.е. угол поворота. Эту точку называют полюсом вращения, а ось - осью вращения.

Если полюс вращения отстоит на 90° от изучаемого геологического тела, то вращение сведется к перемещению по дуге большого круга. При этом геологическое тело будет смещаться по отношению к геомагнитному полю. Если во время такого движения образуются новые горные породы, то направление зафиксированной в них намагниченности будет иметь новые координаты (склонение и наклонение). Например, при перемещении вдоль меридиана от экватора к северному полюсу будет изменяться наклонение намагниченности вновь образующихся горных пород. Намагниченность более древних пород будет иметь небольшое наклонение (вектор напряженности геомагнитного поля на

экваторе горизонтален); направление намагниченности для более молодых пород будет более крутым (см. формулу (1.1)).

Если полюс вращения расположен недалеко от геологического тела (или находится в самом теле), то такое вращение характеризуется в основном изменением ориентировки тела по отношению к полюсам. В этом случае намагниченность вновь образующихся геологических образований будет иметь различающиеся склонения. Тогда говорят о поворотах (или о вращениях в узком понимании этого слова), которые претерпели геологические тела.

Обычно тектонические задачи, решаемые с помощью палеомагнитологии, подразделяют на локальные, региональные и глобальные. Это деление более или менее условно и связано с размерами изучаемых блоков и амплитудами перемещений.

Основное различие для тектонической интерпретации палеомагнитных данных, вероятно, можно охарактеризовать тем параметром, изменения которого интерпретируются. Если такой параметр - наклонение намагниченности, то будет изучаться изменение палеошироты геологического тела (или его перемещение вдоль меридиана). Изменение склонения намагниченности можно интерпретировать как локальные повороты.

Кроме направления намагниченности (т.е. склонения и наклонения) при тектонической интерпретации можно использовать и положение палеомагнитного полюса. Для среднего по палеомагнитной коллекции направления намагниченности некоторого геологического тела могут быть вычислены координаты палеомагнитного полюса того времени, когда эта намагниченность образовалась. Координаты палеомагнитного полюса характеризуются его долготой (Λ) и широтой (Φ).

Поэтому, если для двух геологических тел (например, для двух континентов) имеются для нескольких последовательных геологических эпох средние направления намагниченности, то можно получить траекторию движения палеомагнитного полюса во времени. Если интерпретировать кривую движения палеомагнитного полюса с позиций модели центрального осевого геомагнитного диполя, то движение палеомагнитного полюса кажущееся. Ведь на самом деле геомагнитный полюс неподвижен и совпадает с географическим полюсом, а движутся сами материки. Иными словами, движения материков отражаются в кажущемся движении палеомагнитных полюсов.

Такие полюса называются виртуальными палеомагнитными полюсами. Если траектории движения палеомагнитных полюсов для двух материков на некотором временном интервале совпадают, то это свидетельствует о неизменности относительного расположения материков. Несовпадение траекторий тогда можно объяснить их движениями относительно друг друга.

Таким образом, по направлениям древней намагниченности можно судить о происшедших движениях, восстановить палеошироту и ориентировку относительно сторон света.

Рассмотрим несколько примеров.

1. Лазарев П.П. Основы физики Земли. М.: Госпоттехиздат, 1939. 140 с.

В разделе, описывающем земной магнетизм и его теорию, рассмотрена возможность определения направления геомагнитного поля при изучении античной глиняной посуды. Первоначально сосуд составлял одно целое тело и образовавшаяся в нем при обжиге термоостаточная намагниченность имела направление, одинаковое для всего глиняного сосуда. Это дает повод к восстановлению формы древней посуды на основе измерений направления намагниченности для его осколков. По направлению намагниченности для каждого осколка можно определить, принадлежали ли они одному целому, и восстановить первоначальный вид сосуда.

Этот пример характерен также для тектонических палеомагнитных исследований, одна из задач которых состоит в определении первичного расположения различных геологических тел. Так, с помощью палеомагнитных данных доказано существование в палеозое суперконтинента Гондвана, который в более позднее время распался на части.

2. Van der Voo R. The reliability of paleomagnetic data // Tectonophysics. 1990. Vol. 184. P. 1-9.

Дан совместный анализ фанерозойских палеомагнитных полюсов различных мировых палеомагнитных баз данных для Европы и Северной Америки. Проведена селекция палеомагнитных полюсов на основе выдвинутых автором критериев качества палеомагнитных данных.

Траектории движения палеомагнитных полюсов во временном интервале от ордовика до силура для этих двух континентов различаются при современном их расположении. Это свидетельствует о взаимных перемещениях Европы и Северной Америки в более позднее время. Учет раскрытия Атлантического океана, т.е. совмещение материков в соответствии с гипотезой Вегенера, приводит к согласию кривых миграции палеомагнитных полюсов.

3. Шипунов С.В., Чумаков Н.М. Палеомагнетизм верхнепротерозойских отложений Кольского полуострова // Геотектоника. 1991. N 5. С. 38-50.

В статье получены палеомагнитные данные для верхнерифейских и вендских отложений северного окончания Балтийского щита (табл. 6.1).

Несколько слов о надежности полученных палеомагнитных данных и обосновании возраста.

Таблица 6.1. Результаты палеомагнитного изучения Кольского полуострова

| Геологическое время, млн лет | D | I | A | Φ | Φ _m |
|------------------------------|-----|----|-----|----|----------------|
| 700-800 | 15 | 20 | 195 | 31 | 10 |
| 650 | 103 | 74 | 81 | 51 | 61 |
| 580 | 236 | 25 | 158 | -1 | -13 |

Для первого палеомагнитного определения (красноцветные осадочные породы) установлен доскладчатый возраст намагниченности. Кроме того, показано, что систематические ошибки в определении направления первичной компоненты намагниченности, связанные с возможным присутствием вторичной послескладчатой компоненты, не превышают 10-15°. Возраст намагниченности считается совпадающим с возрастом отложений и составляет 700-800 млн лет по абсолютным К-Аг датировкам.

Второе палеомагнитное определение, установленное для сероцветных осадочных пород, древнее, послескладчатое, не совпадающее ни с одним из известных фанерозойских полюсов. Его направление близко к направлению однокомпонентной намагниченности дайки, секущей осадочную толщу. Возраст намагниченности определен по возрасту надвига и других деформаций, которые являются результатом байкальской складчатости, завершившей развитие изученной зоны. Возраст складчатости, оцененный по изотопным К-Аг датировкам синтетектонических даек п-ва Варангер, 650 млн лет.

Третье определение получено по однокомпонентной намагниченности датированной дайки. На основе микроскопических и магнитоминералогических исследований делается вывод о неизменности единственного магнитного минерала (магнетита) и, следовательно, о вероятной первичности намагниченности.

При интерпретации полученных данных считается, что полярность геомагнитного поля, соответствующего первым двум определениям, обратная - т.е. Балтийский щит располагался в это время в южной полушарии. Это приводит к минимизации возможных перемещений Балтийского щита.

Приведем также данные о траектории движения палеомагнитного полюса Русской плиты для фанерозоя, пересчитанные в палеошироту φ_m северного окончания Балтийского щита (табл. 6.2).

Таблица 6.2. Палеошироты Русской плиты

| Геологическое время, млн лет | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 |
|------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| φ_m | 72 | 55 | 40 | 25 | 0 |

Теперь можно изобразить эти данные, во-первых, в виде графика изменения палеошироты Балтийского щита за последние 800 млн лет, и во-вторых, в виде перемещения Балтийского щита (рис. 6.1 и 6.2). В последнем случае будут видны также и повороты, которые он претерпел за это время.

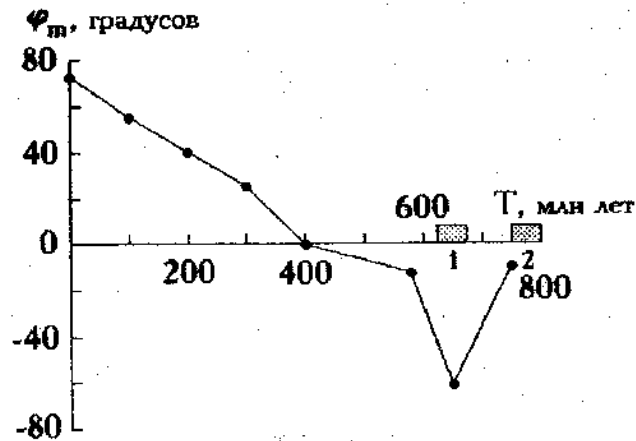


Рис. 6.1. Изменение широты северного окончания Балтийского щита за последние 800 млн лет. 1, 2 — временные интервалы, в которых наблюдаются ледниковые отложения (1) и строматолиты (2)

На основе полученных данных возможно также определение скоростей перемещения Балтийского щита, которые довольно значительны. Получаемые оценки скорости занижены, так как учитываются только изменения широты.

Приведенные данные о палеоширотах Балтийского щита не противоречат имеющимся материалам по стратиграфии, литологии и палеогеографии изученных отложений (см. временное расположение известных проявлений строматолитов и ледниковых отложений на рис. 6.1).

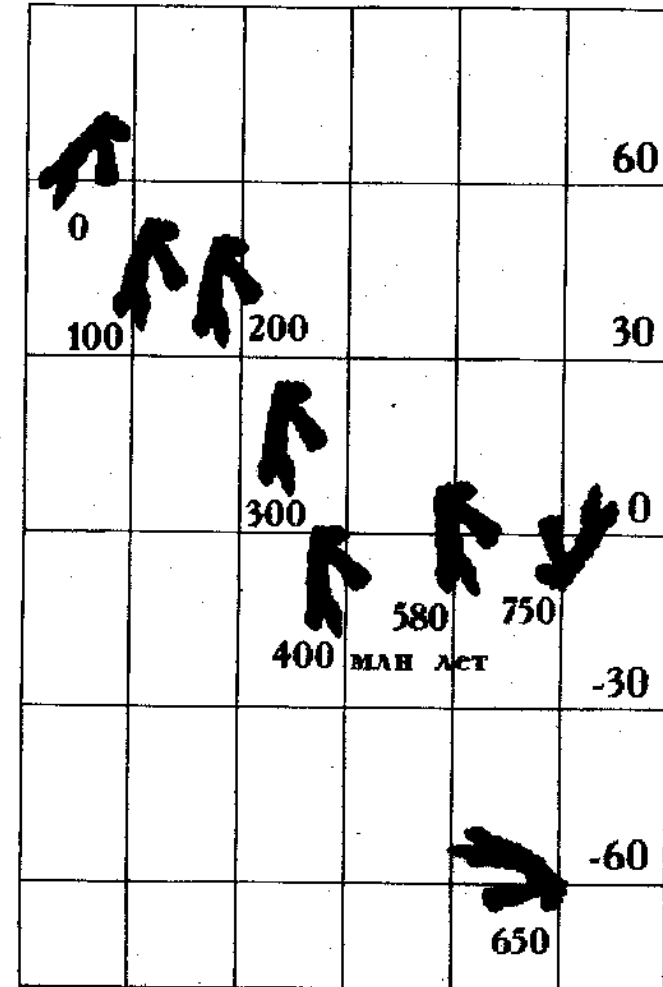


Рис. 6.2. Изменение широтного положения и ориентации Балтийского щита за последние 800 млн лет

4. Баженов М.А., Моссяковский А.А. Горизонтальные перемещения Сибирской платформы в триасе, по палеомагнитным и геологическим данным // Геотектоника. 1986. N 1. С. 59-69.

В статье представлен совместный анализ палеомагнитных данных для Русской и Сибирской платформ. В табл. 6.3 представлены координаты виртуальных палеомагнитных полюсов этих платформ для триаса.

Таблица 6.3. Палеомагнитные данные для Русской и Сибирской платформ в триасе

| Платформа | Λ | Φ |
|-----------|-----------|--------|
| Русская | 164 | 51 |
| Сибирская | 148 | 46 |

Кроме того показано, что для более позднего геологического времени (начиная с юры) траектории миграции палеомагнитных полюсов двух платформ совпадают. Следовательно, можно сделать вывод о времени их сочленения - это поздний триас.

Попробуем воссоздать возможную картину движения. Так как любое движение по поверхности Земли можно рассматривать как вращение, то можно попытаться определить положение полюса вращения и оценить угол поворота.

Полюс вращения должен лежать на дуге большого круга, перпендикулярной середине отрезка, соединяющего два палеомагнитных полюса (см. рис. 6.3). С учетом ошибок в определении координат полюсов, изображенных на рисунке в виде окружности вокруг палеомагнитных полюсов, для возможного положения полюса вращения получим довольно обширную область.

По взаимному расположению Сибирской и Русской платформ и соответствующих палеомагнитных полюсов можно определить знак вращения. Если предположить, что Русская платформа стояла на месте, то Сибирская платформа за изучаемый отрезок времени должна была повернуться по часовой стрелке (см. рис. 6.3).

Это все, что можно сказать, опираясь только на палеомагнитные данные. Сделана попытка найти положение полюса вращения на основании имеющихся геологических данных. В цитируемой статье на этот поиск затрачено 5 страниц. Не будем пересказывать приводимые в статье геолого-тектонические аргументы; отметим только, что местонахождение полюса вращения ищется в палеозойском складчатом обрамлении Сибирской платформы и при этом учитываются имеющиеся зоны сжатия и растяжения.

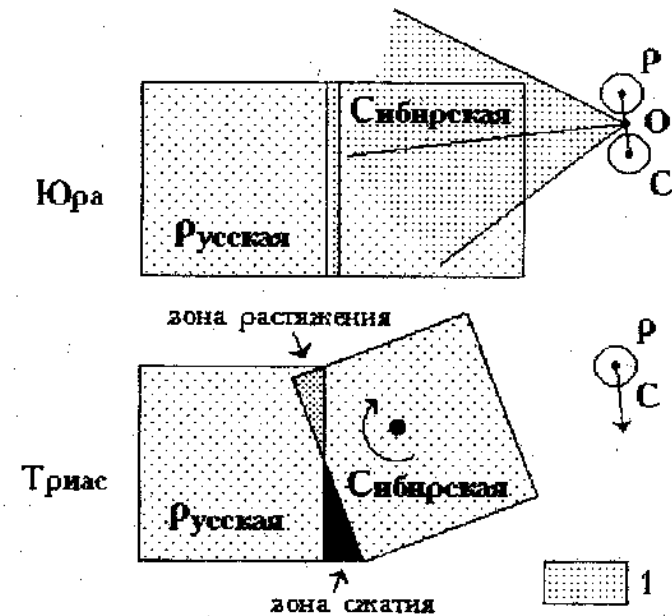


Рис. 6.3. Принципиальная кинематическая схема для Русской и Сибирской платформ и расположение зон сжатия и растяжения
1 - зона возможного расположения полюса вращения

Таким образом, гипотезе о взаимном вращении двух платформ, выдвинутой на основании палеомагнитных данных, было найдено геологическое подтверждение.

Эмилия. Ах, как мне хотелось бы попасть в те удивительные страны, о которых рассказывают в романах. Небо там серое, часто идут дожди, ветер воет в трубах.

Е. Шарц
Обыкновенное чудо

Глава 7

Палеомагнетизм и стратиграфия

Ворон. Так много быстротекущих дней кануло в реку времени, что нетерпение наше перешло границы вероятного.

Е. Шварц
Снежная королева

Как и в начале предыдущей главы, упомянем те явления, которые составляют основу для использования палеомагнетизма в стратиграфии. Их четыре и все они перечислены в конце главы 1.

Какие существуют отличия в применении палеомагнитного метода в стратиграфии от его тектонических приложений? Для тектонической интерпретации палеомагнитных данных используют склонение и наклонение вектора намагниченности и координаты виртуального палеомагнитного полюса. Для стратиграфических приложений иногда достаточно знать только полярность намагниченности, т.е. знак наклонения намагниченности (куда направлен вектор намагниченности - вверх или вниз?). В связи с этим ясно, что к стратиграфическим палеомагнитным исследованиям предъявляются другие требования - достаточно определить полярность намагниченности и оценить возраст однополярных зон. Но в ряде случаев могут также использоваться и другие характеристики. Например, геологическая корреляция возможна на основе сопоставления координат палеомагнитных полюсов или при наклонении вектора намагниченности, близком к горизонту, используется склонение намагниченности.

Как и в предыдущей главе, будем полагать, что направление намагниченности или ее полярность определены какими-либо предварительными палеомагнитными исследованиями достаточно точно.

Вспомним, что земное магнитное поле может иметь две полярности: прямую и обратную. Инверсия (смена полярности) геомагнитного поля занимает отрезок времени порядка 10 тыс. лет. Продолжительность инверсии определяет точность датировок для границ между интервалами разной полярности. Поскольку геомагнитные инверсии - глобальные явления, то они должны быть отражены в геологических разрезах всего земного шара, что позволяет проводить корреляцию зон прямой и обратной полярности на значительных расстояниях.

Таким образом, можно рассматривать всю геологическую историю в терминах полярности магнитного поля Земли как наличие двух состояний. Принято изображать прямую и обратную полярности на шкалах геомагнитной полярности в виде двух цветов. Подобная шкала служит основой для стратиграфической корреляции геологических разрезов. В зарубежной литературе зоны прямой полярности обычно изображают закрашенными, а зоны обратной полярности - незакрашенными. В России первые принято изображать штриховкой, а вторые - закрашенными. В этой главе будем использовать первый способ.

Палеомагнитные исследования в стратиграфии преследуют две цели, которые могут рассматриваться как прямая и обратная задачи. При решении прямой задачи в результате изучения палеомагнитным методом разновозрастные геологические образования создают шкалы геомагнитной полярности. Решение обратной задачи заключается в использовании имеющихся шкал для стратиграфической интерпретации.

Существуют несколько видов шкал геомагнитной полярности, различия между которыми определяются в основном способом оценки возраста и протяженностью шкал во времени:

- шкала линейных магнитных аномалий океанов;
- магнитохронологическая шкала, основанная на датировках абсолютного возраста;
- шкала геомагнитной полярности в донных осадках океана,
- магнитостратиграфическая шкала, основанная на палеомагнитном изучении стратотипических разрезов.

В самом общем виде интервалы одной полярности принято разделять на зоны и эпизоды, которые различаются своей продолжительностью.

С помощью палеомагнитного метода возможно решение разнообразных стратиграфических задач, основные из которых перечислены ниже.

1. Расчленение или стратификация геологических разрезов на основе разнополярных зон.

2. Корреляция разновозрастных геологических разрезов, точная корреляция некоторых уровней (границ палеомагнитных зон). В этом случае при совпадении палеомагнитных зон можно говорить о возможной корреляции разрезов, а при их несовпадении - о том, что эти разрезы разновозрастные.

3. Привязка геологического разреза к магнитостратиграфической шкале района и региональная корреляция разрезов.

4. Привязка магнитостратиграфической шкалы к магнитохронологической, точное определение возраста границ палеомагнитных зон и межрегиональная и глобальная корреляция разрезов.

Кроме того, возможно решение и других задач, таких, например как сопоставление различных стратиграфических границ, в частности бивон,

определение их синхронности и сохранности, оценка скоростей осадконакопления, оценка возраста дна океана и др.

Вот, пожалуй, и все. Можно приступать к корреляции геологических отложений...

Пусть имеются два геологических разреза близкого возраста с палеомагнитными определениями, достаточными для построения палеомагнитных разрезов, на которых отражены имеющиеся разнополярные зоны. Корреляцию этих геологических разрезов только по палеомагнитным данным можно провести самыми различными способами. Поэтому здесь не обойтись без хотя бы приблизительных данных о возрасте.

Такие данные могут быть получены по абсолютным датировкам, по палеонтологическим и стратиграфическим данным. Только в этом случае можно привязать изучаемый разрез к определенному участку магнитостратиграфической или магнитохронологической шкалы, проводить корреляцию и уточнить временную привязку некоторых границ. Вероятно, это и есть то дополнительное знание, получаемое палеомагнитным методом.

Рассмотрим несколько примеров.

1. Вулканические поднятия и глубоководные осадки востока Центральной Атлантики. М.: Наука, 1989. С. 76-89.

Используя данные по наннопланктону с применением зональной шкалы Гартнера (рис. 7.1), по нескольким донным колонкам определен приблизительный возраст отложений (последние 2 млн лет) и проведена взаимная корреляция.

| Возраст | Критерии выделения зон |
|----------------|-------------------------------------------------------|
| 10,5 БРЮНЕС | → Доминирование <i>E. huxleyi</i> |
| | → Появление <i>E. huxleyi</i> |
| | → Исчезновение <i>P. lasiosa</i> |
| 1,0 МАТУЯМА | → Конца доминирования ископаемых <i>Serphurocarpa</i> |
| | → Исчезновение <i>H. sellii</i> |
| 1,5 МАТУЯМА | → Исчезновение <i>S. macintyreii</i> |
| | → Исчезновение <i>D. bronwerti</i> |

Рис. 7.1. Зональная шкала Гартнера

Применение палеомагнитного метода позволило выделить нескольких зон геомагнитной полярности (рис. 7.2). Сопоставляя эти данные с результатами изучения наннопланктона, можно утверждать, что выделенные зоны соответствуют эпохам Брюнес и Матуяма (прямая и обратная полярности намагниченности). Для эпохи Матуяма в некоторых колонках имеется участок, намагниченный в прямом поле, вероятно, это эпизод прямой полярности Харамильо.

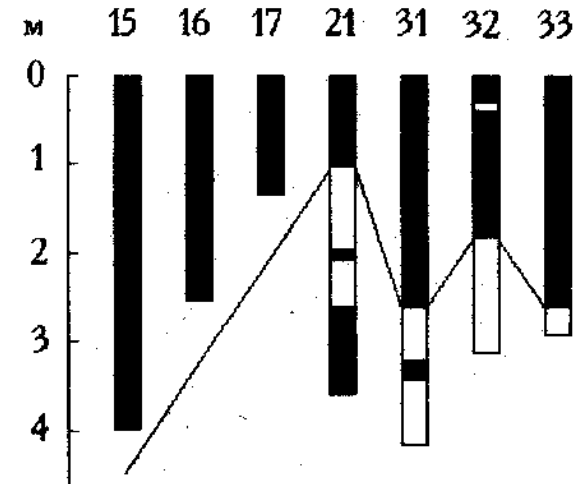


Рис. 7.2. Корреляция донных колонок по биостратиграфическим и палеомагнитным данным

Таким образом, стало возможна более точная корреляция. По сопоставлению с известными шкалами геомагнитной полярности определен возраст границ, соответствующих границам палеомагнитных зон, и оценена скорость осадконакопления.

2. Щигунов С.В. О палеомагнетизме катавской свиты Южного Урала // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 3. С. 97-109.

Для двух приблизительно одновозрастных (поздний протерозой) геологических разрезов, для которых по геологическим данным определена приблизительная корреляция по кровле и подошве красноцветных слоев, проведены палеомагнитные исследования.

Выделенная намагниченность однокомпонентна. Применение полевых тестов (тест складки и тест обращения) дает положительный результат. Таким образом, нет оснований отвергнуть гипотезу о доскладчатости и первичности изучаемой намагниченности.

Палеомагнитные разрезы имеют по две протяженные зоны обратной полярности сверху и снизу каждого из разрезов, средние части обеих

разрезов представлены частым чередованием разнополярных палеомагнитных зон (рис. 7.3).

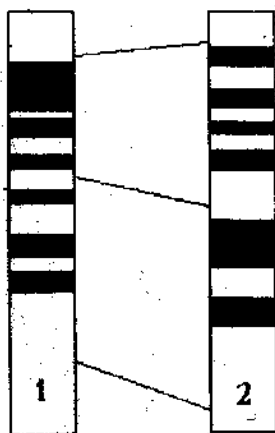


Рис. 7.3. Геологическая и палеомагнитная корреляция разрезов Волаково (1) и Миньяр (2) (Южный Урал)

Корреляция палеомагнитных разрезов подтвердила предполагаемую корреляцию красноцветных пластов для двух удаленных друг от друга разрезов (при прямых полевых наблюдениях невозможно было проследить границы пластов).

3. Шишунов С.В., Чумаков Н.М. Палеомагнетизм верхнепротерозойских отложений Кольского полуострова // Геотектоника. 1991. N 5. С. 38-50.

В этом несколько специфическом случае не получено никаких зон - изученная намагниченность имеет одну полярность. Для корреляции между разновозрастными разрезами использованы направления намагниченности (или, что то же самое, координаты палеомагнитных полюсов). Кроме того, стратиграфические данные о корреляции разрезов применены наряду с другими палеомагнитными и геологическими критериями надежности для подтверждения древности выделенной намагниченности.

Изучены два позднепротерозойских разреза приблизительно одного возраста (п-ов Средний и о-ва Кильдин), для которых по геологическим данным известна корреляция отложений двух свит. С использованием палеомагнитных данных установлены направления намагниченности и координаты палеомагнитных полюсов. Оказалось, что полюса двух свит п-ва Средний значительно отличаются друг от друга (кружки на рис. 7.4). Для разновозрастных свит о-ва Кильдин наблюдается такая же картина (квадраты на рис. 7.4). Между этими двумя разрезами палеомагнитные полюса и направления намагниченности разновозрастных по геологическим данным свит совпадают (точнее, различаются незначительно).

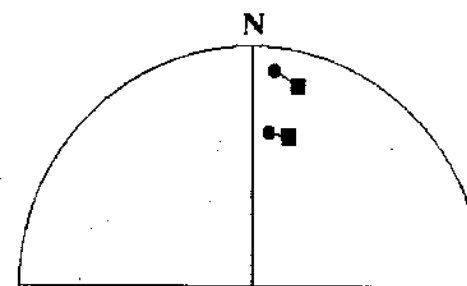


Рис. 7.4. Средние направления намагниченности разновозрастных осадочных образований (линиями представлена геологическая корреляция) п-ова Средний (кружки) и о-ва Кильдин (квадраты)

Учитывая, что изменение направления намагниченности во времени связано с движениями Балтийского щита, можно сделать обоснованное предположение о том, что древность выделенной намагниченности подтверждается стратиграфическими данными и палеомагнитные и геологические данные не противоречат друг другу.

В данном примере использовалась так называемая полюсная стратиграфия (корреляция осуществлялась не по разнополярным зонам, а по координатам виртуальных палеомагнитных полюсов). Такое использование палеомагнитных данных свойственно в основном древним толщам, т.е. для тех случаев, когда между образованием сравниваемых отложений прошло достаточно много времени для кажущегося смещения палеомагнитного полюса.

Охотник. ...это самые достойные люди на земле! Это все честные, простые парни. Они любят свое дело. Они вязнут в болотах, взбираются на горные вершины, блуждают по такой чаще, где даже зверю приходится жутко. И делают они все это не из любви к наживе, не из честолюбия, нет, нет! Их ведет благородная страсть! Понял?

Е. Шарц
Обыкновенное чудо

Глава 8

Содержание палеомагнитной статьи

Критерии качества

Человек. Действительно ли это живые розы? а) издают запах, свойственный этому растению; б) обладают соответствующей окраской и, наконец, в) растут из подобающей почвы.

Е. Шевру
Свежая королева

Статьи с палеомагнитным содержанием можно условно разделить на две группы, которые определяются направленностью исследований и областью геологии, в которой могут быть использованы палеомагнитные данные. Это тектонические и стратиграфические палеомагнитные статьи. Конечно при этом мы выбросили из всего объема палеомагнитных статей статьи специальной тематики, в которых не предусматриваются геологические приложения.

Кроме такой классификации можно предложить еще одну, важную с точки зрения оценки надежности палеомагнитных данных.

- Статьи, в которых описано получение оригинального палеомагнитного результата.

- Статьи, в которых используются ранее полученные (возможно другими палеомагнитологами) данные.

Для первого типа статей в силу того, что все вопросы палеомагнитной "кухни" должны быть в них описаны, можно непосредственно оценить качество (надежность) полученных палеомагнитных данных. В статьях второго типа используются ранее полученные палеомагнитные результаты, поэтому для оценки читателем их качества автор должен изложить использованные критерии и проанализировать качество данных.

Конечно, каждый палеомагнитолог по-своему видит предмет исследований и по-своему пишет статьи, поэтому в результате можно увидеть что-то удивительно-уникальное. Но палеомагнитология все-таки стремится к разряду точных наук - то здесь, то там появляются числа и даже что-то говорится об их точности. И, хотя вроде бы в науке и не следует требовать четкого следования определенным правилам, в настоящее время сложились некоторые требования, которым должны

удовлетворять палеомагнитные результаты вообще и палеомагнитные статьи в частности. Эти требования, критерии качества палеомагнитных данных применяются для оценки их надежности в статьях, использующих в геологических целях ранее опубликованные результаты.

Вероятно, могут быть опубликованы практически любые палеомагнитные данные; но представление материала в них должно позволять читателю оценить, каким образом получены результаты и насколько они обоснованы. Поэтому какой-то план палеомагнитной статьи можно все-таки рассмотреть.

План палеомагнитной статьи

1. Введение. История изучения и цель данной статьи.
2. Геологическое описание района исследований.
3. Методика проведения полевых и лабораторных палеомагнитных исследований.
 - Результаты палеомагнитных исследований.
 - Магнитные чистки.
 - Способы и методы выделения компонент намагниченности.
4. Точность выделения компонент, систематические ошибки, среднее направление намагниченности.
 - Доказательство древности (первичности) намагниченности палеомагнитные тесты.
 - Временная привязка выделенных компонент намагниченности.
5. Описание других палеомагнитных данных по району.
6. Критерии включения других палеомагнитных результатов.
7. Геологическая интерпретация результатов.
8. Выводы.

Конечно, возможны вариации в зависимости от целей, поставленных исследователем. Например, в палеомагнитных статьях без геологической интерпретации может не быть пп. 5 и 6, а в обобщающих статьях - пп. 3 и 4. Но в любом случае наиболее важными разделами палеомагнитных статей, по-видимому, будут пп. 4, 5 и 6, в которых затрагиваются вопросы достоверности (описываются способы выделения компонент намагниченности, их точность и систематические ошибки, определение возраста, временная привязка выделенных компонент и критерии включения других палеомагнитных результатов).

Какие палеомагнитные результаты имеет смысл рассматривать? Общий принцип - палеомагнитные исследования должны быть опубликованы, и не в тезисах или каталогах палеомагнитных направлений и полюсов, а именно в статьях, так как только в этом случае возможна оценка их достоверности.

Перечислим возможные критерии качества, т.е. те требования,

которым должны удовлетворять палеомагнитные данные.

1. Должна быть проведена полная (до температур Кюри) магнитная чистка с частым шагом, достаточным для разделения компонент намагниченности, либо показано, почему при неполной чистке все-таки можно использовать выделенные компоненты намагниченности.

2. Компоненты намагниченности должны быть выделены с помощью одного или нескольких методов компонентного анализа или показано, почему можно без этого обойтись и использовать, например, направления намагниченности после какого-либо шага чистки.

3. Количество образцов должно быть достаточным для осреднения палеомагнитных вариаций и получения достаточной для геологических приложений точности для направления намагниченности.

4. Необходимо доказательство древности выделенных компонент намагниченности с помощью одного или нескольких полевых тестов. Используемые тесты должны быть корректными. Наличие в обработанной палеомагнитной коллекции компонент намагниченности обеих полярностей и положительный результат теста обращения свидетельствует в пользу древности выделенных компонент намагниченности и об отсутствии вторичных компонент других направлений.

Возможны и другие критерии, позволяющие с доверием относиться к качеству палеомагнитных данных. В уже использованной в главе 6 статье Ван дер Во приводятся семь критериев, которым приписывается одинаковая значимость. В зависимости от того, выполняется или не выполняется каждый из критериев, палеомагнитному определению присваивается фактор качества, который может принимать значения от 0 (для очень плохих палеомагнитных данных) до 7 (для очень хороших).

Кратко перечислим эти критерии.

1. Хорошо определенный возраст изучаемых пород и уверенность в том, что намагниченность имеет тот же возраст.

2. Достаточное количество образцов (более 24), величина кучности (более 10) и точность определения среднего палеомагнитного направления (менее 16°).

3. Достаточная качественная магнитная чистка, результаты которой продемонстрированы.

4. Применение полевых тестов, которые позволили определить возраст намагниченности.

5. Структурный контроль и тектоническая связь с кратоном.

6. Наличие намагниченности двух полярностей.

7. Отсутствие сходства с палеомагнитными полюсами более молодых горных пород.

При проведении палеомагнитных исследований (по крайней мере при изучении осадочных горных пород), как правило, нет гарантии в доказательстве первичности той или иной компоненты намагниченности.

Поэтому очень важным критерием достоверности получаемых палеомагнитных данных (так называемый критерий внешней сходимости) служат совпадение или непротиворечивость палеомагнитных результатов, полученных для фациально различающихся удаленных разновозрастных геологических объектов с разным составом магнитных минералов.

В заключение приведем высказывание Карла Поппера из его работы "Логика научного исследования" (в кн.: "Логика и рост научного знания". М.: Прогресс, 1983. 606 с.). "...какое бы решение некоторой проблемы мы не предлагали, мы сразу же самым серьезным образом должны стараться опровергнуть это решение, а не защищать его. Немногие из нас, к сожалению следуют этому предписанию. К счастью, если мы сами не занимаемся критикой наших рассуждений, то критике подвергаются другие. Однако их критика будет плодотворной только в том случае, если мы сформулировали нашу проблему со всей возможной ясностью и придали решению этой проблемы достаточно определенную форму, в которой ее можно критически обсуждать".

Цирюльник. Он верит любому вымыслу сочинителя, словно священному писанию.

Е. Шеври
Дон-Кихот

Послесловие

Дон-Кихот. Ну вот и все сеньоры. Вспоминайте меня на свой лад, как просит ваша душа. Пусть останусь я в памяти вашей не Дон-Кихотом Ламагским. Бог с ним.

Е. Шварц
Дон-Кихот

Вот и настало время проститься. И еще несколько ничего не значащих слов. Чтобы не обрывать слишком заушной фразой.

Вы познакомились с "элементами палеомагнитологии". И со мной. В сущности это одно и то же. Ведь вы обратились ко мне. И я рассказал вам обо всем, что думаю.

Не знаю, насколько мне удалась эта роль, роль писателя и учителя? Возможно, я плохо играл ее. И у вас останутся лишь недоумение и раздражение. А может быть и по другому. И тогда вы будете воспринимать где-либо вновь услышанное слово "палеомагнетизм" как старого хорошего знакомого. И вам будет приятно следить за его успехами, помогать ему и делиться с ним плодами своих мыслей. И тогда не откладывайте свой и его успех. Вы уже много знаете, достаточно опытные. Можно начинать.

Спасибо за внимание.

Сказочник. Ну-с, вот как-будто и все. Можно начинать.

Е. Шварц
Снежная королева

Библиография

Король. Книжки надо читать и не требовать от короля того, что он не в силах сделать.

Е. Шварц
Обыкновенное чудо

Баженов М.А. Анализ разрешающей способности палеомагнитного метода при решении тектонических задач // Геотектоника. 1988. № 3. С. 14-25.

В статье, специально написанной для тектонистов, дан анализ геологических и геофизических факторов, влияющих на разрешающую способность палеомагнитного метода при решении тектонических задач. Оценены амплитуды тектонических движений и вращений, которые могут быть реально определены по палеомагнитным данным. Эта статья обязательно должна быть прочитана.

Баженов М.А., Буртман В.С. Структурные дуги Альпийского пояса: Карпаты-Кавказ-Памир. М.: Наука, 1990. 167 с.

В книге изложены результаты структурно-палеомагнитных исследований, на основе которых проведены ревизия и тектоническая интерпретация палеомагнитных данных по Альпийскому поясу. Предложены палеотектонические реконструкции и обсуждено происхождение структурных дуг.

Девис Дж. Статистический анализ данных в геологии. М.: Недра, 1990. Кн. 1. 320 с.; Кн. 2. 428 с.

Настоятельно рекомендуемая книга для тех, кто впервые собирается окунуться в приложения статистических методов в геологии. Содержит раздел, посвященный анализу ориентированных данных.

Зоненшайн А.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 192 с.

В книге известных специалистов в области палеогеодинамики последовательно рассматриваются методы, применяемые для палеогеодинамического анализа: геологические, геохимические, кинематические, палеомагнитные и палеоклиматические. Раздел, посвященный палеомагнитному методу, написан на простом и понятном для геологов языке.

Ле Пиншон К., Франшто К., Бонив Ж. Тектоника плит. М.: Мир, 1977. 287 с.

Одна из первых книг по тектонике плит, в которой достаточно полно и глубоко освещены геофизические и кинематические аспекты гипотезы мобильных литосферных плит. Имеются разделы, в которых используются палеомагнитные данные: временная шкала геомагнитного поля и координаты палеомагнитных направлений и палеомагнитных полюсов для тектоники плит.

Нагата Т. Магнетизм горных пород. М.: Мир, 1965. 237 с.

Детально изложены вопросы магнетизма горных пород; содержатся обширные данные по методике и результатам изучения магнитных свойств.

Палеомагнитология /Ред. А.Н.Храмов. Л.: Недра, 1982. 312 с.

Наиболее современная книга на русском языке, посвященная полнейшему рассмотрению проблем палеомагнетизма. Содержит специальные главы, в которых разбираются приложения палеомагнитных методов в тектонике и стратиграфии.

Палеомагнетизм палеозоя /Ред. А.Н.Храмов. Л.: Недра, 1974. 238 с.

Книга охватывает весь круг вопросов палеомагнетизма палеозоя от построения палеомагнитной хроностратиграфической шкалы и планетарной корреляции до рассмотрения гипотезы дрейфа континентов на основе мировых палеомагнитных данных.

Печерский Д.М. Петромагнетизм и палеомагнетизм. М.: Наука, 1985. 128 с.

Справочник, представляющий собой вполне доступный и хорошо составленный словарь большинства терминов из области палеомагнетизма и петромагнетизма. Может быть полезен при чтении специальной палеомагнитной литературы.

Трубикин В.М. Палеомагнетизм и стратиграфия акчагыльских отложений Западной Туркмении. М.: Наука, 1977. 80 с.

Хороший пример применения палеомагнитного метода в стратиграфии. На основе построенной палеомагнитной шкалы для верхнего палеоцена изученного региона проведена корреляция разрезов морских и континентальных отложений.

Харланд У.Б., Кокс А.В., Лавеллин П.Г., Пиктон К.А.Г., Смит А.Г., Уолтерс Р. Шкала геологического времени. М.: Мир, 1985. 140 с.

Книга написана видными учеными и наиболее полно отражает все сведения по разработке хроностратиграфической шкалы на основе геохронологических, радиометрических и палеомагнитных методов.

Храмов А.Н. Палеомагнетизм и проблемы аккреционной тектоники северо-западного сегмента Тихоокеанского подвижного пояса // Палеомагнетизм и аккреционная тектоника. Л.: ВНИГРИ. 1988. С. 141-153.

На основе синтеза палеомагнитных данных построена количественная база для изучения явлений аккреционной тектоники в послепермское время. Приведены оценки масштабов смещения и поворотов, а также определено время начала и завершения аккреции различных частей региона.

Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии. М.: Мир, 1986. 192 с.

Сжатое введение в геостатистику для тех, кто хочет получить максимум информации в малом объеме. В двух главах изложены основы анализа двумерных и трехмерных ориентированных данных.

Чумаков Н.М. Главные ледниковые события прошлого и их геологическое значение // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1984. № 7. С. 35-53.

Проведен совместный анализ глобальных реконструкций на основе палеомагнитных и палеоклиматических данных и показана их непротиворечивость начиная с палеозоя.

Шипунов С.В. Основы палеомагнитного анализа: Теория и практика. М.: Наука, 1993. 159 с.

Содержание книги затрагивает основные методы выделения и датирования компонент намагниченности в горных породах. Особое внимание уделяется вопросам оценки качества палеомагнитных результатов. Содержатся примеры применения изложенных методов для изучения палеомагнетизма верхнепротерозойских отложений Южного Урала и Кольского полуострова.

Яновский Б.М. Земной магнетизм. Л.: АГУ, 1978. 592 с.

4-е издание известного учебного пособия для геофизиков физических и геологических факультетов университетов. Учебное пособие представляет собой всеохватывающее описание земного магнетизма и написано на высоком научном уровне. Содержит главу "Палеомагнетизм".

Elming S.A., Pesonen L.J., Leino M.A.H., Khranov A.N., Mikhailova N.P., Krasnova A.F., Mertanen S., Bylund G., Terho M. The drift of the Fennoscandian and Ukrainian shields during the Precambrian: a palaeomagnetic analysis / *Tectonophysics*. 1993. Vol. 223. P. 177-198.

В статье представлена пересмотренная кривая кажущегося блуждания палеомагнитных полюсов на основе палеомагнитной базы данных. Проводится сравнение истории дрейфа двух щитов (Балтийского и Украинского).

Fisher N.I., Lewis T., Embleton B.J.J. Statistical analysis of spherical data. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 330 p.

Одна из последних книг по статистическому анализу векторов на сфере. Описаны новейшие статистические методы их анализа.

Mardia K.V. Statistics of directional data. London: Academic Press, 1972. 357 p.

Полнейший обзор статистических методов обработки двумерных и трехмерных ориентированных данных. Многие примеры взяты из геологии.

McElhinny M.W. Palaeomagnetism and plate tectonics. Cambridge: Cambridge University Press, 1973. 358 p.

Классическая книга, содержащая достаточно полные сведения по теории палеомагнетизма и магнетизма горных пород. Направлена на решение различных тектонических задач палеомагнитным методом.

Torsvik T.H., Smethurt M.A., Van der Voo R., Trench A., Abrahamsen N., Halvorsen E. Baltica. A synopsis of Vendian-Permian palaeomagnetic data and their palaeotectonic implications // *Earth-Science Reviews*. 1992. N 33. P.133-152.

В статье на основе известных палеомагнитных данных по Балтийскому щиту приведена селекция с использованием критериев качества и рассмотрена история и кинематика дрейфа Балтики, ее взаимодействие с другими палеоконтинентами для различных периодов геологического времени (венд-пермь).

Van der Voo R. Palaeomagnetism of the Atlantic, Tethys and Iapetus oceans. Cambridge: University press, 1993. 412 p.

Очень хорошая книга, в которой на основе палеомагнитных данных с современных позиций описываются теория континентального дрейфа и тектоника плит. В приложении приведены обширнейшие таблицы с координатами палеомагнитных полюсов для различных плит, дана оценка качества приводимых палеомагнитных данных.

Оглавление

| | |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие | 3 |
| Глава 1. Физические основы палеомагнетизма | 5 |
| Глава 2. Последовательность палеомагнитных операций | 15 |
| Глава 3. Графическое представление палеомагнитных данных | 20 |
| Глава 4. Выделение компонент намагниченности | 26 |
| Глава 5. Датирование компонент намагниченности | 30 |
| Глава 6. Палеомагнетизм и тектоника | 40 |
| Глава 7. Палеомагнетизм и стратиграфия | 48 |
| Глава 8. Содержание палеомагнитной статьи. Критерии качества | 54 |
| Послесловие | 58 |
| Библиография | 59 |

Contents

| | |
|---------------------------------------------------------------|----|
| Foreword | 3 |
| Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism | 5 |
| Chapter 2. Succession paleomagnetic procedures | 15 |
| Chapter 3. Graphic presentation of paleomagnetic data | 20 |
| Chapter 4. Separation of magnetic components | 26 |
| Chapter 5. Dating of magnetic components | 30 |
| Chapter 6. Paleomagnetism and tectonics | 40 |
| Chapter 7. Paleomagnetism and stratigraphy | 48 |
| Chapter 8. Content of a paleomagnetic paper. Quality criteria | 54 |
| Closing words | 58 |
| References | 59 |

