RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES GEOLOGICAL INSTITUTE

S.V.Shipunov ELEMENTS OF PALEOMAGNETOLOGY

Элементы палеонагнитологии / 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 достоверности палеомагнитной намагниченности. оценке компонент информации. Рассмотрены контерии качества палеомагнитных данных, поавильной опенки пачеомагнитных публикаций важные для специальной дитературе. Поиведены поимеры поименения 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 высдения в палеомагнитологию.

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

Редакционная коллегия: Леонов (гланный 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

© С.В. Шипунов, 1994

[©] Геологический институт РАН, 1994

Предисловие

Аннундиата. 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. Швару. Тень

Эта книга написана на основе курса лекций, прочитанного мной студентам четвертого курса кафедры "Общая геология и геокартирование" Москонской геологоразведочной академин 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 убеждвет меня в том, что существующие в настоящее время издания по палеомагнетизму сложны для этой категории читателей (см. библиографию в конце книги).

В объем 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 гоамотно 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 геологических и геофизических вузов как введение в специальность "Палеомагжитология".

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 геологический 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.

Овавдение изложенным материалом появолит 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.З.Гурарию, взявшему на себя труд по редактированию рукописи. М.Л.Баженов, 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 исчернал всю проблематику, ватронутую в книге, и буду благодарен за любую критику, направленную на улучшение содержания и стиля изложения.

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

Е. Шварц Голый король

Глава 1 Физические основы палеомагнетизма

Тенъ. Вот вам последние выводы моей науки.

Е. Шварц 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).

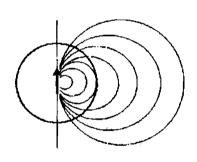


Рис. 1.1. Приблизительная картина распределения силовых линий геомагнитного поля

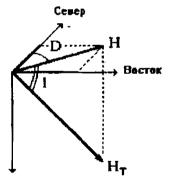


Рис. 1.2. Элементы вемного магнетизма

Характеристикой Земли отонтинтым RAOH СЛУЖИТ вектор напряженности Нт. который геомагнитного RAON определяет напоавление поля и его силу. К основными элементам вектора напряженности геомагнитного поля \mathbf{H}_{T} на земной поверхности относятся его направление, определяемое склонением D и наклонением I, и величина вектора (рис. 1.2). Склонение характеризует отклонение проекции вектора напряженности геомагнитного поля на горизонтальную

плоскость от направления на географический северный полкос, наклонение угол между горизонтальной плоскостью и вектором напряженности $\mathbf{H}_{\mathbf{T}}$.

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 влементов геомагнитного поля. Прямыми наблюдениями земного магнитного поля за последние примерно 400 лет (они были начаты во времена Гильберта), а также по результатам магнитных наблюдений на археомагнитных объектах и молодых горных породах установлено, что геомагнитный полюс перемещвется вокруг географического таким объектом, что в среднем его положение совпадает с географическим.

Вовтому 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.

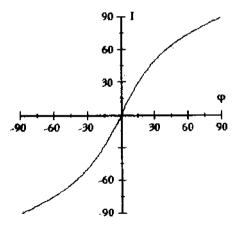


Рис. 1.3. Зависимость наклонения геомагнитного поля от викроты

Геометрическая конфигурация магнитного поля центрального осевого магнитного диполя имеет одну очень важную особенность - наклонение геомагнитного поля I определяется широтой места ф. 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 горивонтален и направлен в сторону северного геомагнитного полюса (рис. 1.1).

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

$$tg(1) = 2 tg(\varphi). \tag{1.1}$$

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

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

При обжиге кружек и последующем их охлаждении в магнитных минералах, содержащихся в каолине, из которого в основном состоят 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.



Рыс. 1.4. Наихонение намагниченности на различных фарфороных 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. ${\bf B}$ 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 сориентировать 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 глине при обжиге.

Палеомагнетизм - физическое явление, ваключающееся в фиксации и сохранении направления и величины геомагнитного поля магнитными минералами горных пород в виде вектора остаточной намагниченности. Палеомагнитология 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:

$$\mathbf{J} = \mathbf{\kappa} \mathbf{H} + \mathbf{J}_{\mathbf{P}} \tag{1.2}$$

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

Анць некоторое, крайне ограниченое 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 втих природных минералов использовалось общее название ферромагнетики, т.е. вещества, способные к магнитному самоупорядочиванию. Впоследствии они были подразделены на несколько видов и термин "ферромагнетик" стал применяться только для редко встречающихся в природе минералов, например для самородного желева. В дальнейшем изложении будем применять для всех этих веществ более общий термин - "магнитные минералы"

Назовем самые распространенные из них:

- магнетит (температура Кюри 580° С);
 гематит (температура Кюри 675° С);
- титаномагнетит (температура Кюри варьирует в зависимости от взаимного содержания титана и железа от низких температур до 580° С 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 возникнет 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 væe известная термоостаточная нам намагниченность. Здесь и далее приводятся два обозначения видов намагниченности; первое из них (TRM) принято в зарубежной отечественной. **Теомоостаточная** (J_{rt}) литературе, второе 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** ориентационная намагниченность, осадочная, детритная. Иногда се подразделяют названия постседиментационную. Эта седиментационную остаточная И намагниченность возникает пои 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 магнитным стреакам под воздействием эемного магнитного поля.
- 3. CRM (J_{TC}) 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 кристализационная намагниченость присуща, в частности, красноцветным осадочным породам (их намагниченность возникла при образовании пигмента).

4. VRM (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 Клори, воздействием геременного магнитного поля или просто поместив образцы горных пород правда на очень длительное время в немагнитное простоанство.

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 размагничивания, 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 (нли вместо нее) наложится новвя.

Намагниченность любого вида, образующаяся в горных породах, носит статистический карактер. Это означает, что при образовании, например, ориентационной намагниченности каждое отдельное зерно ориентируется магнитного минеоала He обязательно строго полем. что BHELLIHUM геомагнитным соответствии c поисутствием пои 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 К (в зарубежной литературе для обозначения кучности применяется греческая буква К). Кучность векторов намагниченности (или, как еще говорят, палеомагничных векторов) характеризует разброс векторов намагниченности для отдельных образдов вокруг некоторого среднего направления. Среднее направление для однокомпонентной намагниченности (например, для намагниченности, образовавляейся единовременно и, следовательно, при одном направлении земного магнитного поля) приблизительно будет совпадать с направлением геомагниного 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 конусогодобной области, включающей 95% векторов намагниченности, при различных значений 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 налеомагнитных 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 (палеовековые) 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 палеовековыми

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

Возникающая ГООНЫХ породах поиродных несколько намагниченность может содержать оазных компонент различных по своей природе (т.е. намагниченности ΠO времени образования. направлению и намагниченности). магнитных минералов. Такая суммарная намагниченность горных пород называется естественной остаточной намагниченностью и обозначается NRM HAH J...

По времени образования компонент намагниченности принято разделять на первичную (синхронную с образованием горной породы), вторичную (или метахронную) и современную. Равличие между метахронной 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 метахронной намагничености, количество которых определается количеством и интенсивностыю наблюдавшихся во время существования горной породы воздействий, например региональных прогревов или химических изменений.

В предыдущем абзаце была упомянута полярность вемного 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 ют.

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

отмечена около 0.73 ман лет навад.

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

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

Сейчас мы живем в влоху 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 ваняли свое совоеменное положение. Затем возникция пои обратной полярности геомагнитного поля вязкая раврущаться и намагниченность стала ĸ нынешнему практически Полностью исчезла: ВОЗНИКАВ ОДНАКО намагниченность прямой полярности. Кроме того, при некоторых изменениях первичного магнитного титаномагнетита могла возникнуть химическая намагниченность. Таким образом, возникнет сложная намагниченность, состоящая из тоех компонент остаточной намагниченности: первичной намагниченности обратной полярности (время образования 1 млн лет назад) и двух современных - химической и вязкой.

Возникшие три компоненты 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 компонет намагниченности.

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

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 Ф).
- Онксация направления геомагнитного поля в магнитных минералах горных пород.
 - Смена подярности геомагнитного подя.
 - Тектонические движения блоков эемной коры.

Ученый. Очень трудно будет все вто 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

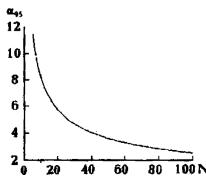
-Теперь приступим к настоящей работе. В сущности, все это не трудно, дорогая моя.

Е. Шесрц Зелушка

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 штуфов из разных стратиграфических уровней; по крайней мере число штуфов 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 увереняюсти полагать, что внутри- и межпластовый разброс будет осреднен.

Рис. 2.1. Зависимость точности в градусах определения среднего 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 палеовековым вариациям геомагнитного поля).

В качестве геологического объекта может выступать дайка, несколько 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.

Пои палеомагнитных исследованиях изучаются векторные величины, поэтому отобранные для анализа палеомагнитные образцы должны быть ооиентированными. хынгингвмоэльп Пон отборе всех отоджки винэжолоп мозапмом михочитоловт иссемен каждого штуфа в пространстве. К таким замерам относится измерение направления и угла падения пород для каждого опробованного штуфа). стратиграфического уровня (т.е. a выбоо также 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 геологическим компасом.

Ориентация палеомагнитных образцов необходима для восстановления его первоначального положения в пространстве (например, до деформаций слоев при складкообразовании). Всномним, что для определения местонахождения вавода-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 бурильные установки, а выбуриваемый кери распиливается на цилиндры. При этом маркируется верхняя образующая цилиндрического керна и вместо направления падения принято измерять азимут простирания пород.

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

направлением древнего геомагнитного поля. Для восстановления первоначального направления векторов намагниченности вводят поправку за современный наклон слоев гооных пород (так тектоническая коорекция). В наямпаемая связи пилокотинтамовкап существует Takoe понятие. Обычно палеомагнитных координат. разаичают современило (географическую) и древнюю (стратиграфическую) системы координат. Как следует из наввания, напоавление вектора намагниченности в современной системе координат - это направление, которое он занимает в настоящее воемя: в доевней системе кооодинат - направление вектора намагниченности до смятия пластов в складку (онс. 2.2). Пои этом предполагается (и это предположение чаще всего подтверждается), что пои складкообразовании породы претерневают простое вращение, заключающееся в повороте на некоторый угол вокруг горизонтальной OCH.

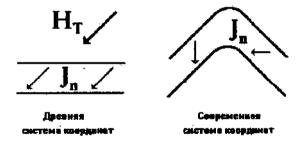


Рис. 2.2. Изменение положения вектора намагниченности после складкообразования

В палеоматнитологии 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 валегания пласта.

В результате подготовительных операций (отбора ориентированных палеомагнитных штуфов и "распиловки" - 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.

Повтому в ходе лабораторных исследований ставится задача повозможности 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 физическими свойствами. Например, намагниченность, связанная с гематитом, разрушится при нагревании образца до температуры Кюри гематита, т.е. при 675° С. Для магнетита это 580° С, для титаномагнетита температура Кюри может быть еще меньше.

Поэтому, если нагревать образцы в специальных печах, иногда возможно (часто? или редко?) с применением 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 яваяется остаточное магнитное поле. Идевльным было бы полное его отсутствие, т.е. полная компенсация магнитного поля лаборатории. В образовываться противном случае MOUVT новые намагниченности в остаточном магнитном поле лаборатории (так называемое лабараторное подмагничивание образцов).

Аабораторные испытания палеомагнитных образуюв, заключающиеся в воздействии на них размагничивающих факторов, называются магнитными чистками. В данном случае это температурная чистка (чистка нагревами). Возможных и другие виды магнитных чисток, например чистка переменным магнитным полем (подобно размагничиванию переменным магнитным полем экранов телевнзоров), 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 ниде тройки декартовых координат х, у и х. Используя замеры прстранственного положения маркировки палеомагнитных образцов и пластов горных пород (т.е. азимуты и уголы 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 орнентированных 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, Золупка, моя звездочка! Ты котела побежать в парк, постоять под королевскими окнами.

-Можно? спрашивает девочка радостно.

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

> Е. Шварц Золушка

Глава 3

Графическое представление палеомагнитных данных

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

Е. Шевру. Тень

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

предыдущей Kak измеоении отмечалось глане. HOII намагниченности магнитометре получают компоненты ня намагниченности в декартовых координатах, т.е. величины х. у и х. Эти намагниченности оотогональные кооодинаты векторов пересчитываются в сферические координаты, примерно такие же, как географические координаты, определяющие положение точки на вемной Сферические вектора повеожности. координаты намагниченности элементам земного магнетизма (см. рис 1.2) 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 - вто 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 втим 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.

TTO направления векторов, задаваемых, 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 вовникать при осреднении почти вертикально направленных векторов намагниченности при компьютерной обработке.

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

Диаграмма Зийдеовельда используется для изображения векторов в декартовых координатах, стереограмма намагниченности спеоических. В первом случае отражаются все три декаотовы координаты вектора намагниченности, BO BTODOM сферические координаты: склонение и наклонение.

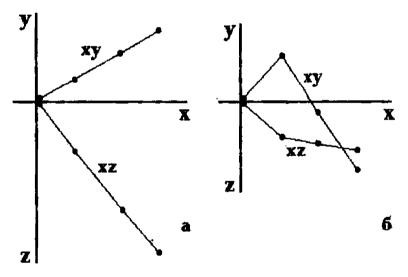


Рис. 3.1. Диаграмма Зийдервельда результатов магнитной чистки однокомпонентной (а) и двухкомпонентной (б) намагниченности

Изображение на диаграмме Зийдервельда представляет собой изображение вектора намагниченности в проекции на две ортогональные которые располагаются на одном рисунке, напоимео на оис. 3.1. Пон этом одному вектору XV H XZ намагниченности соответствуют две точки на диаграмме Зийдервельда (по одной точке на каждой плоскости). При изображении результатов магнитной чистки одного палеомагнитного образца на диаграмме Зийдернельда 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.

Разаичают 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).

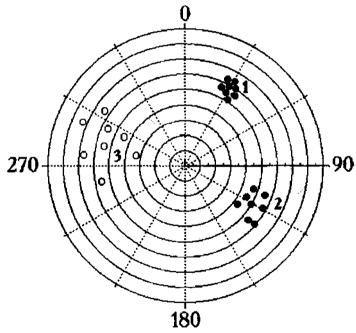


Рис. 3.2. Примеры распределений палеомагнитных векторов с различной кучностью на равнопромежуточной полярной проекции. 1, 2, 3 - кучность векторов 200, 50 и 30 соответственно

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

сохраняется неизменным пои перемещении по поверхности щара сферического треугольника - расстояние, площадь или углы).

Следует упомянуть некоторые иногда используемые на сфере алементы 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 центо 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 случаем малого, как и эемной 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 концентрических окружностей. Для изображения палеомагнитных полюсов используют экваториальную и другие виды проекций.

Все векторы, изображаемые на стереограммах, имеют единичную данну. 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 закращенных кружков, векторы с отрицательным наклонением пезакращенных кружков (см. рис. 3.2). В табл. 3.1 представлены основные характеристики распределений векторов намагниченности, изображенных на стереграмме рис. 3.2.

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

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

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

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

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

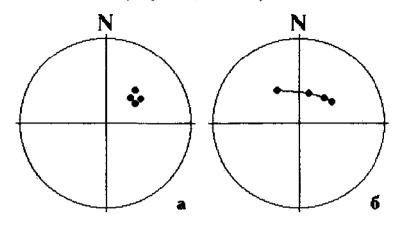


Рис. 3.3. Стереограмма результатов магнитной чистки однокомпонентной (a) и двухкомпонентной (б) намагниченности

2. Двужювичениная наминиченность. Если в ходе магнитной чистки разрушается сначала одна компонента, а затем другая, то на диаграмме Энйдервельда (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, 6). На стереограмме в этом случае векторы намагниченности, измеренные после каждого этапа ступенчатой магнитной чистки, будут располагаться на большом круге (см. рис. 3.3, 6). Это происходит потому, что два любых вектора и их сумма располагаются в одной плоскости.

Ситуация усложнится, если разрушение компонент намагниченности происходит одновоеменно. Большой круг на стереограмме останется протяженность), (возможно изменится его на диагоамме **Зийдервельда** могут трансформироваться прямые возникнут криволиченные участки, протяженность которых может запимать весь интервал размагничивающих воздействий. При полной идентичности свойств компонент намагниченности к размагничивающим воздействиям сдучаю разрушения однокомпонентной подобна будет намагниченности, но это будет кажущаяся однокомпонентность. В этом случае разделение компонент намагниченности невозможно.

3. Тои компоненты и более. Этот случай сводится к предыдущему. Есан происходит поочередное разрушение разанчных компонент Зийдервельда намагниченности. на диаграмме характеризующие направления последовательные поямые. последовательно разрушаемых в процессе магнитной чистки компонент намагниченности. В поотивном случае наблюдаемая картина может оказаться значительно запутанней. Следует иметь в виду, что такие случан возможны, и тогда требуется довольно кропотливая работа по нылелению этих компонент намагниченности и опоеделению их направления.

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

> > E. Illegou Тень

Глава 4

Выделение компонент намагниченности

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

Е. Шаарц Дон-Кикот

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 испольвованием) диаграмм Зийдервельда 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 втом случае возможно (но не всегда) разделение комнонент 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. Однокомпонентиная наминаченность. На стереограмме векторы не меняют своего направления в ходе чистки; на диаграмме Эмйдервельда видна одна приблизительно прямая линия, спадающая по мере разрушения вектора намагниченности в начало координат.

В этом случае можно:

- вычислить анпроксимирующую прямую и определить для нее наповиление;
- 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 перными двумя способами.
- 2. Две и более компоненты намагаченности. При последовательном разрушении различных компонент намаганченности в процессе магантной чистки можно:
- вычисанть аппроксимирующие прямые для всех прямолинейных участков и определить для них направления;
- вычисанть 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.

Физических свойствах различных близких намагниченности по отношению к разрушающим воздействиям некоторых случаях (для двухкомпонентной намагниченности) можно пересечения ВОСПОЛЬЗОВАТЬСЯ TAK называемым метолом 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 ощибок.

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 связанный. векторов. разброс палеомагнитных напонмео. вариациями, ошибками измерений палеонсковыми или причинами. Кроме того вычисляют кучность распределения выделенных компонентным анализом векторов и радиус круга доверия для среднего направления каждой компоненты (α_{95}), характеризующий точность полученого 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 намагниченености 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 затронуто в следующей главе.

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

Повтому 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,

19801.

3. От 2-х до 4-х образцов из каждого штуфа прошли ступенчатую температурную магнитную чистку вплоть до 600° С. Компонентный анализ диаграмм Зийдервельда проводился с помощью компьютерной программы [Тогвуік, 1987]. Направления компоненты намагниченности, выделенной на интервале температур T=220÷300° С, хаотичны и, вероятно, связаны с некоторой намагниченностью, являющейся суммой современной, лабораторной и древней компонент. Поведение векторов намагниченности во время магнитной чистки выше T=250÷400° С 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 ревультирующие после прогрева до 400° С векторы намагниченности. Кроме того, в статье не приведены графические материалы (примеры диаграмм Зийдервельда и стереограмм), поэтому у читателя отсутствует возможность оценить не только качество палеомагнитного результата, но 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 Зийдервельда 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.

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

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. Шеару 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 3mнеосоценить. так наяываемые поление тесты. возраста послназначенные RAL оценки выделенных компонент намагниченности. Датирование проводится по отношению к времени какого-нибудь геологического события, например складкообразования, переотаожения пород в виде конгломератов наи 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 логии - если из высказывания (или события) $\mathbf A$ следует $\mathbf B$, и если $\mathbf B$ не выполняется, то не верно и $\mathbf A$.

Например, если полученные направления намагниченности для двух одновозрастных геологических объектов первичны (событие А), то они должны совпядать (событие В). Если же эти два направления равличаются (событие В не выполняется), то, следовательно, неверно и соанниваемых XOTR бы одна из геологические объекты намагниченности He пеовична Или одновозрастны). С другой стороны, если действительно полученные направления совпадают, то это не онилетьеро справеданно высказывание А. Это могло саучится, 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, нока новые факты не заставят исследователя изменить свое мнение.

Каждый пелеомагнитный тест используется для проверки нескольких геологических и геофивических предположений (в рассмотренном выше примере поисутствуют два предположения о первичности компонент намагниченности и одновозрастности изучаемых горных пород). На основе этих предположений формулируется так называемая нулевая гипотеза Н. (два направления намагниченности совпадают), которая может быть проверена с помощью процедуры проверки статистических гилотез. Для тестирования выбирается некоторая числовая величина статистика критерия (в данном случае статистикой может быть угловое оасстояние 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 нывод о несоответствии палеомагнитных данных провершемой гипотезе и она должна быть отверснута.

Тест складки

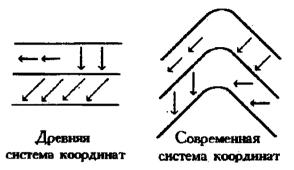
При возникновении первичной намагниченности в горизонтально залегающих осадочных горных породах все векторы намагниченности будут приблизительно совпадать. Если в последующеем пласты пород в результате складкообразования изменили свое положение, то соответствующие изменения произойдут и с векторами намагниченности. Таким образом, для первичной (доскладчатой) намагниченности палеомагничные 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 влементов залегания пластов.

На рис. 5.1 приведена излюстрация такой принципиальной возможности оценки времени возникновения намагниченности по отношению к складкообразованию. Намагниченность нижнего изакта 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 намагниченности практически означает ее первичность. Наоборот, если складчатость, например, альпийская, а породы нижнепалеозойские, то для возраста доскладчатой намагниченности будет получена только верхняя оценка (намагниченность возникла не поаднее альпийского времени).



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

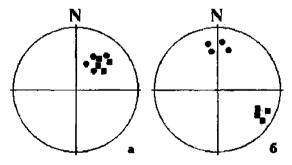


Рис. 5.2. Распределение векторов доскладчатой намагниченности в древней (a) и современной (б) системах координат. Кружками и квадратиками обозначены направления для двух крыльев складки

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.

• Намагниченность 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 намагниченности совпадают в древней системе координат, то намагниченность доскладчатая; если они совпадают в современной системе координат, то намагниченность послескладчатая.

На рис. 5.2 представлено распределение векторов намагниченности для двух крыльев складки в древней и современной системах координат для случая доскладчатой намагниченности. 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, 6) распределения векторов намагниченности для крыльев складки не совпадают и их средние направления различаются значимо.

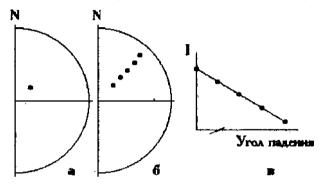
Две корректные модификации теста складки основаны на сравнении средних направлений намагниченности (например, для крыльев складки тест сравнения средних направлений) или на выявлении зависимости (корреляции) распределений векторов намагниченности от элементов залегания. Эти модификации теста складки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

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

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

интерпретация этого ревультата как присутствие синскладчатой намагниченности, т.е. намагниченности, образованиейся 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 влементах залегания пластов и/или недостаточен объем изученной палеомагнитной коллекции.



Рыс. 5.3. Иллюстрация зависимости направления намагниченности (наклонения I) от влементов залегания (угла падения) слоев в современной системе координат для доскладчатой намагниченности

а - распределение векторов в древней системе координат (все векторы совпадают между собой); 6 - распределение векторов в современной системе координат для случая совпадения авимута 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 неопределения.

Существует еще одна очень часто применяемая модификация теста СКАВДКИ - ТАК НАЗЫВВЕМЫЙ ТЕСТ ВЫРАВНИВАНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА СРАИНЕНИИ кучностей распределений намагниченности в древней и современной системах координат. Если кучность в доевней системе координат значительно превышает кучность векторов намагниченности современной системе координат, то делается вывод о том, доскладчатая намагниченность преобладает. Поскольку установить ПОСЛЕСКЛАЛЧАТОЙ намагниченности до-HAN 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 лелаемые некорректен. HA основе ныводы намагниченности не обоснованы, поэтому использование 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 B пространстве (кучность распределдения векторов намагниченности будет близка к нулю) в силу хаотичности расположения галек в контломератах. С другой стороны, если намагниченность галек CVMMA намагниченности и вторичной, образованшейся после персотложения виде конгломератов, TO распределение намагниченности носит более закономерный характер (на хаотичное распределение первичной намагниченности галек наложится вторичная некоторой конечной кучностью). Кучность намагниченность 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 вти же породы в коренном залегании и считать выделенные компоненты намагниченности коренных пород додеформационными.

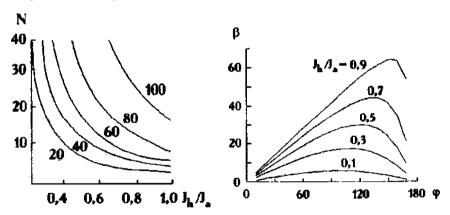
Проверяемая гипотеза в тесте галек кучность распределения векторов галек в современной системе координат равна нулю. Этот достаточно строгий с точки эрения математики тест, к сожалению, мало чувствителен к присутствию вторичной намагииченности. На рис. 5.4

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

Например, если для коллекции, состоящей из 10 галек, тест дает (нулевая положительный DESVABLET гипотеза первичности намагниченности принимается), то вероятность обнаружения вторичной (последеформационной) компоненты намагниченности варьировать от 80 до 20% в зависимости от степени перемагничивания. быть **установлена** втооичная может 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.



Рыс. 5.4. Зависимость вероятности обнаружения вторичной компоненты тестом галек от объема коллекции (N) и отношения величии вторичной и первичной компонент $\hat{J}_{\bf h}/J_{\bf h}$

Рис. 5.5. Зависимость угловой ошибки β в определении вектора первичной намагниченности от отношения величин вторичной и первичной компонент намагниченности $J_{\bf k}/J_{\bf a}$ 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 меньшей 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 содержаний 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, 6). 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, возникией во время внедрения интрузии, а данные, представленные на рис. 5.6, 6, могут означать полное перемагничивание всех изученных пород.

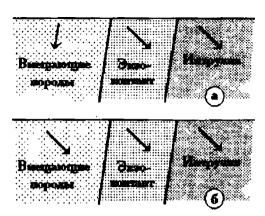


Рис. 5.6. Пример взаимоотношения направлений намагниченности интрузии и вмещающих гюрод для первичной (а) и вторичной (б) намагниченности вмещающих пород

Иногда асе-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 обратнонамагниченные породы, то средние направления такой первичной намагниченности J_a для прямо- и обратнонамагниченных 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 утол между средними направлениями для разнополярных частей разреза J_a 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.

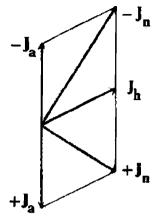


Рис. 5.7. Схема возникновения угловых ошибок при подмагничивании вторичной компонентой намагниченности $\mathbf{j}_{\mathbf{k}}$ первичной равноволярной компоненты $\mathbf{j}_{\mathbf{k}}$

Существует способ снизить ощибки в определении направления первичной намагниченности (так называемый метод обращения) для случая, когда результат тестирования отрицательный. При выполнении втого способа векторы намагниченности одной ИЗ поляоностей обращаются, затем для всей совокупности векторов определяется соеднее направление. К сожалению, оценки направления первичной намагниченности, подученные этим методом. всегда смещены истинного направления, и величина угловой ошибки в определении направления первичной компоненты намагниченности завмент от величним процентного соотношения первичной и вторичной компонент намагниченности по разрезу.

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

Е. Швару Голый тороль

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 какимлибо путем получены датированные компоненты намагниченности. Следует однако учитывать, что ите две важные процедуры (выделение компонент палеомагнитного анализа и датирование намагниченности) относятся к самым **ИММИВЕRV** местам мобых исследований. Вель палеомагнитных насколько OHPOT выделены компоненты намагниченности и насколько точно они датированы, настолько точно и убедительно будет следствие геологическая интеопретация палеомагнитных данных.

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

С номощью 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 новорота. 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 уэком 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 ддя тектонической интеопостации можно охарактеризовать **Палеомагнитных** данных. вероятно, которого интерпретируются. Если изменения параметром, параметр наклопецие намагниченности, то будет изучаться изменение палеошироты геологического (нан его перемещение тела Изменение намагниченности СКЛОНЕНИЯ можно интерпретировать как локальные повороты.

Кроме направления намагниченности (т.е. склонения и наклонения) при тектонической интерпретации можно использовать и положение налеомагнитного 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 впох средние направления намагниченности, то можно получить траекторию движения палеомагнитного полюса во времени. Если интерпретировать кривую движения палеомагнитного полюса с поэнций 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 налеошироту и ориентировку относительно сторон света.

Рассмотрим несколько примеров.

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

В разделе, описывающем эемной магнетиэм 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 обжите термоостаточная намагниченность имела направление, одинаковое для всего глиняного содуда. 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 сосуду.

Этот пример карактерен 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.

Трасктории 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. C. 38-50.

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

Несколько слов о надежности полученных палеомагнитных данных и обосновании возраста.

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

Таблица 6.1. Результаты палеомагнитного изучения Кольского полуострова

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 K-Ar 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 K-Ar датировкам синтектонических даек п-ва Варангер, 650 млн лет.

Третье определение получено по однокомпонентной намагниченности датированной дайки. На основе микроскопических и магнитоминералогических исследований делается вывод о неизмененности 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 южном полушарии. Это приводит к минимизации возможных перемещений Балтийского щита.

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

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

Таблица 6.2. Палеоілироты Русской плиты

Теперь можно изобразить эти данные, во-первых, в виде графика изменения палеоппироты 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.

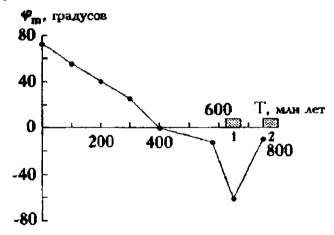


Рис. 6.1. Изменение широты северного окончания Балтийского щита за последние 800 млн лет. 1, 2 временные интервалы, в которых наблюдаются ледниковые отложения (1) и строматолиты (2)

На основе полученных данных возможно также определение скоростей перемещения Балтийского которые довольно щита, Получаемые значительны. оценки скорости занижены, так KAK 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 проянлений строматолитов и ледниковых отложений на рис. 6.1).

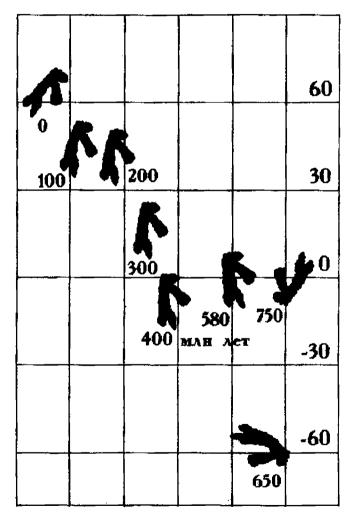


Рис. 6.2. Изменение широтного положения и ориентации Балтийского щита за последние 800 млн лет

4. Баженов М.А., Моссаковский А.А. Горизонтальные перемещения Сибирской платформы в триасе, по палеомагнитным и геологическим данным // Геотектоника. 1986. N 1. C. 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 поэднего геологического времени (начиная с юры) траектории миграции налеомагнитных полюсов двух платформ совпадают. Следовательно, можно сделать вывод о времени их сочленения - это поэдний триас.

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

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

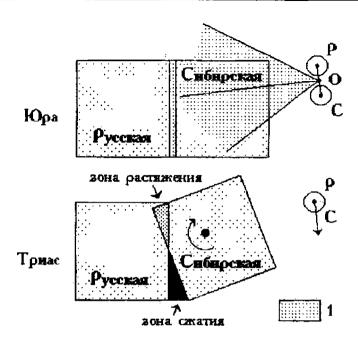


Рис. 6.3. Принципиальная кинематическая схема для Русской и Сибирской плавтформ и расположение вон сжатия и растяжения

1 - вона возможного расположения полюса вращения

Таким образом, гинотезе 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. Неботам серое, часто идут дожди, ветер воет в трубах.

Е. Шварц Обыкновенное чудо

Глава 7

Палеомагнетизм и стратиграфия

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

Е. Шеарц. Снежная королева

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

Какие существуют отличия в поименении палеоматного метода в стратиграфия от его тектонических приложений? Для тектонической интерпретации палеомагнитных данных используют склонение наклонение вектора намагниченности и координаты виотуального палеомагнитного полюса. Для стратиграфических приложений иногда только поляоность намагниченности, **Э**НАТЬ наклонения намагниченности (куда направлен вектор намагниченности вверх или виня?). В связи с этим ясно, что к стратиграфическим палеомагнитным исследованиям предъявляются другие требования достаточно определить полярность намагниченности и оценить возраст одноподяющих зон. Но в ояде случаев могут также использоваться и другие карактеристики. Например, геологическая корреляция возможна на основе сопоставления координат палеомагнитных полюсов или при намагниченности. близком гооизонту. вектора испольвуется склонение намагниченности.

Кан и в предыдущей глане, 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 ванимает 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 вемного 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 прображают закрашенными, а зоны обратной полярности незакрашенными. В России первые принято изображать штриховкой, а торые закрашенными. В этой главе будем использовать первый способ.

Палеомагнитные исследования в стратиграфии преследуют две цели, которые могут рассматриваться как прямая и обрагная 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 эоны 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 одновозрастных геологических разрезов, точнаи 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 налеомагнитных эон и межрегиональная и глобальная корреляции разрезов.

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

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 налеомагнитных 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 магнятостратиграфической или магнитохронологической шкал, проводить корреляцию и уточнять временную привязку некоторых границ. Вероитно, 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 коооеляция.

| B | озраст | Критерии выделения вон | | | |
|-------|--------|---|--|--|--|
| 0,5 | БОЮНЕС | Доминирование E. huxleyi Появление E. huxleyi | | | |
| | E C | Исчелновение Р. Гасилова | | | |
| 1,0 | M A | —— Консц доминирования мелямх Серһугосарва | | | |
| 2 | y | Исчевнование Н. sellii | | | |
| - | Я М | → Исчезновение С. macintyre | | | |
| MAN I | A | Исчевновение D. brouweri | | | |

Рис. 7.1. Зональная шкала Гартнера

Применение палеомагнитного метода позволило выделить нескольких зон геомагнитной полярности (рис. 7.2). Сопоставляя эти данные с результатами изучения наинопланктона, можно утверждать, что выделенные воны 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.

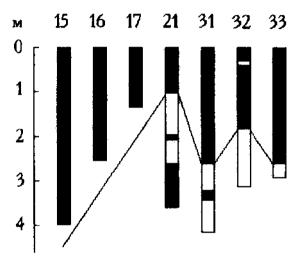


Рис. 7.2. Корреляция донных колонок по биостратиграфическим и палеомагнитным данным

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

2. Щипунов С.В. О палеомагнетизме катавской свиты Южного Урала // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. N 3. C. 97-109.

Для двух приблизительно одновозрастных (поздний протерозой) геологических разрезов, для которых по геологическим данным определена приблизительная корреляция по кровле и подошне красноциетных 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 обоих

разревов представлены частым чередованием разнополярных палеомагнитных эон (рис. 7.3).



Рис. 7.3. Геологическая и палеомагнитная корреляция разрезов Волково (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. Шипунов С.В., Чумаков Н.М. Палеомагнетизм верхнепротерозойских отложений Кольского полуострова // Геотектоника, 1991. N 5. C. 38-50.

В этом несколько специфическом случае не получено никаких зон изученная намагниченность имеет одну полярность. Для корреляции разрезами одновозрастными направления использованы намагниченности (или, что то же самое, координаты палеомагнитных полюсов). Кооме того. стратиграфические данные 0**830630**B поименены наряду с другими налеомагнитными геологическими коитеонями надежности для подтверждения доевности выделенной намагниченности.

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

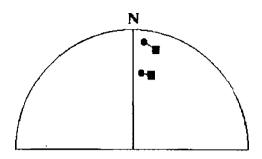


Рис. 7.4. Средние направления намагниченности одновозрастных осадочных образований (линиями представлена геологическая корреляция) п-ова Средний (кружки) и о-ва Кильдин (квадраты)

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 толіцам, т.е. для тех случаев, когда между образованием сравниваемых отложений прошло достаточно много времени для кажущегося смещения палеомагнитного полюса.

Охотинк. ... вто 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 страсты! Понял?

Е. Шварц 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. Швару. Свежная королева

Статън 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 врения оценки надежности палеомагнитных данных.

- Статьи, в которых описано получение оригинального палеоматнитного результата.
- Статьи, в которых используются ранее полученные (возможно другими палеомагнитологами) данные.

Для первого типа статей в силу того, что все вопросы памимагнитной "кухни" должны быть в них описаны, можно непередственно оценить качество (надежность) полученных палемагнитных 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 ужидеть 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, котя вроде бы в науке и не следует требовать четкого следования определенным правилам, в настоящее время сложились некоторые требования, которым должны удовлетворять налеомагнитные результаты вообще и налеомагнитные статым 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 заволять читателю оценить, каким образом получены результаты и исколько 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.
 - 4. Результаты палеомагнитных исследований.
 - Магнитные чистки.
- Способы и методы выделения компонент намагниченности. 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 налеомагнитных результатов.
 - 7. Геологическая интерпретация результатов.
 - 8. Выводы.

Конечно, возможны вариации в зависимости от целей, поставленных исследователем. Например, в налеомагнитных 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 налеомагнитных статей, по-видимому, будут пп. 4, 5 и 6, в которых ватрагиваются вопросы достоверности (описываются способы выделения компонент намагниченности, их точность и систематические опибки, определение возраста, временная привязка выделенных компонент и критерии включения других палеомагнитных результатов).

Какие палсомагнитные результаты имеет смысл рассматривать? Общий принцип палеомагнитные исследования должны быть опубликованы, и не в тезисах или каталогах палсомагнитных направлений и полюсов, а именно в статьях, так как только в атом 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 палеовековых 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. Использованные тесты должны быть корректными. Наличие в обработанной палеомагнитной коллекции компонент намагниченности обеих полирностей 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 пложих 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. Достаточные количество образцов (более 24), величина кучности (более 10) и точность определения среднего палеомагнитного направления (менее 16°).

3. Достаточно качественная магнитная чистка, результаты которой

продемонстрированы.

- 4. Применение полевых тестов, которые позволили определить възраст намагниченности.
 - 5. Структурный контроль и тектоническая связь с кратоном.

6. Наличие намагниченности двух полярностей.

7. Отсутствие сходства с палеомагнитными полюсами более молодых горинах 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 одновозрастных 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 анания" 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 подвергают нас 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 священому писанию.

Е. Шеару 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 Ламанчским. Бог с ним.

Е. Шоарц Дон-Кихот

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

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

Не анаю, 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 опытны. Можно начинать.

Спасибо за внимание.

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

Е. Шварц Снежная королева

Библиография

W

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 палеомагнитиото метода при решении тектонических задач // Геотектоника, 1988, № 3. С. 14-25.

В статье, специально написвниой 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 дут.

Девис Дж. Статистический аналив 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.

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

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

Ас Пишон К., Франшто К., Бонин 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 общирные 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 палеовом / 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. Палеомагнетням 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 плиоцена изученного региона проведена корреляция разрезов ворских и континентальных отложений. Харланд У.Б., Кокс А.В., Алексалин П.Г., Пиктон К.А.Г., Смит А.Г., Уолтерс Р. Шкала геологического времени. М.: Мир. 1985. 140 с.

Книта написана видными учеными и наиболее полно отражает исе сведения по разработке кроностратиграфической шкалы на основе фиккронологических, радиометрических и палеомагнитных методов.

женов А.Н. Палеомагнетизм и проблемы аккреционной тектоники реверо-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 объемс. В двух главах изложены основы анализа двухмерных и трехмерных ориентированных данных.

Чумаков Н.М. Главные ледниковые события прошлого и их геологическое значание // 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 палеовоя.

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.: ЛГУ, 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., Khramov 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 analisys 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.

McElhinay 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 palaeotectonoc implications // Earth-Science Reviews. 1992. N 33. P.133-152.

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

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

Очень хорошая книга, в которой на основе палеомагнитных данных с современных повиций описываются теория континентального дрейфа и тектоника плит. В приложении приведены общирнейшие 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 | |
| Глава 7. Палеомагнетизм и стратиграфия | _ 48 |
| Глава 8. Содержание палеомагнитной статьи. Критерни качества | |
| Послесловие | 58 |
| Библиография | |
| A | |
| Contents | _ 3 |
| Foreword | |
| | _ 5 |
| Foreword Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism | _ 5 _ 15 |
| Foreword Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism Chapter 2. Succession paleomagnetic procedures | 5 15 20 |
| Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism Chapter 2. Succession paleomagnetic procedures Chapter 3. Graphic presentation of paleomagnetic data | _ 5 _ 15 _ 20 _ 26 |
| Foreword Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism Chapter 2. Succession paleomagnetic procedures Chapter 3. Graphic presentation of paleomagnetic data Chapter 4. Separation of magnetic components | 5 15 20 26 30 |
| Foreword Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism Chapter 2. Succession paleomagnetic procedures Chapter 3. Graphic presentation of paleomagnetic data Chapter 4. Separation of magnetic components Chapter 5. Dating of magnetic components | _ 5 _ 15 _ 20 _ 26 _ 30 _ 40 |
| Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism | 5 15 20 26 30 40 48 |
| Chapter 1. Physical foundation of paleomagnetism | 5 15 20 26 30 40 48 54 |