

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ПАЛЕОМАГНИТНОГО АНАЛИЗА

Объект изучения палеомагнетизма.....	1
Палеомагнитное определение	2
Палеомагнитные векторы на сфере	2
Палеомагнитные системы координат	3
Вращение векторов.....	3
Пересчет вектора из современной системы координат в древнюю	4
Пересчет вектора из древней системы координат в современную.....	4
Перевод совокупности векторов к центру стереографической проекции	4
Перевод отцентрированной совокупности векторов к нецентрированной	4
Большие и малые круги	4
Литература	5

ОБЪЕКТ ИЗУЧЕНИЯ ПАЛЕОМАГНЕТИЗМА

Модель, используемая при проведении палеомагнитных исследований, базируется на следующих фундаментальных предположениях (гипотезах) [Храмов и др., 1982]:

1. Геомагнитное поле, осредненное за сравнительно малый в геологическом масштабе времени промежуток, является полем центрального осевого магнитного диполя, ось которого совпадает с осью вращения Земли. Геометрическая конфигурация магнитного поля такого диполя имеет важную для тектонических приложений особенность – наклонение геомагнитного поля определяется широтой места.

2. Горные породы могут намагничиваться по направлению внешнего магнитного поля, соответствующего времени и месту образования намагниченности, и эта намагниченность может сохраняться достаточно долго.

Остаточная намагниченность, возникающая в горных породах, носит статистический характер. Это означает, что при ее образовании магнитный момент каждого отдельно взятого зерна магнитного минерала не обязательно ориентируется строго в соответствии с направлением внешнего геомагнитного поля, что связано с существованием различных дезориентирующих факторов. Магнитные частицы, являющиеся носителями остаточной намагниченности в горной породе, образуют статистические ансамбли и, измеряя намагниченность образца, всегда имеют дело с некоторым средним значением по ансамблю. Направление такой суммарной намагниченности близко к направлению геомагнитного поля в момент ее образования.

Осредняя направление геомагнитного поля за некоторый промежуток времени, получают среднее, так называемое *палеомагнитное поле*, которое подчиняется закону центрального осевого диполя, что позволяет определить широту места образования намагниченности по ее наклонению и ориентировку относительно сторон света. Таким образом, изучая остаточную намагниченность в горных породах, естественно применять статистические методы.

Важное требование, предъявляемое при палеомагнитных исследованиях, – для того, чтобы с достаточной точностью отражать направление палеомагнитного поля необходима достаточно представительная коллекция палеомагнитных ориентированных образцов.

Изучаемая палеомагнитологом естественная остаточная намагниченность может представлять суперпозицию нескольких компонент намагниченности, различающихся видом остаточной намагниченности, временем образования, направлением и составом магнитных минералов, что является отражением сложных геологических процессов, происходящих в течение «жизни» горной породы. Поэтому первостепенной задачей палеомагнитных исследований является выделение из суммарной довольно сложной намагниченности

характерных ее компонент и определение времени их образования, восстанавливая, тем самым, направление древнего геомагнитного поля. Возможность разделения составляющих естественную остаточную намагниченность компонент основана на различной стабильности компонент намагниченности к размагничивающим воздействиям [Петрова, 1977].

Основой для тектонических приложений палеомагнетизма служит так называемое *палеомагнитное определение*. Этим и определяется спектр используемых методов статистики, позволяющих выделить из естественной остаточной намагниченности составляющие ее компоненты, датировать их и определить угловую точность средних векторов для палеомагнитных коллекций.

ПАЛЕОМАГНИТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Результатом проведенного *палеомагнитного анализа* является *палеомагнитное определение*, т.е. *датированное направление* палеомагнитного поля с характеристиками его точности (см., например [Шипунов, 1999; 2000]). Палеомагнитное определение, полученное для выборки векторов намагниченности объема N , может быть выражено двумя способами: в пространстве направлений (в виде направления намагниченности) и в пространстве полюсов (в виде координат палеомагнитного полюса).

Среднее направление намагниченности (его средние склонение D и наклонение I), и радиус круга доверия α_{95} , определяющего область, в которой с вероятностью 95% находится истинное (искомое) направление намагничивающего палеомагнитного поля. Дополнительной качественной характеристикой распределения совокупности вошедших в палеомагнитное определение векторов намагниченности является кучность к этой совокупности, отражающая степень концентрации векторов вокруг среднего направления. При этом предполагается [Шипунов, 1994; Шипунов и др., 1996], что результирующая совокупность векторов является однокомпонентной, т.е. намагниченность образовалась в магнитном поле одного направления и одного возраста, и внутрипластовый и межпластовый разброс (последний, например, связан с палеогеомагнитными вариациями геомагнитного поля) в некоторой степени усреднены.

Другим видом численного представления палеомагнитного определения являются координаты *палеомагнитного полюса*, выражающиеся в долготе (L_p) и широте (F_p) палеомагнитного полюса, овал доверия для которого (аналогичный по смыслу кругу доверия для среднего палеомагнитного направления) определяется двумя его радиусами.

После датирования полученного направления намагниченности с помощью полевых тестов [Печерский, 1985; 2006; Печерский, Диденко, 1995] (тест складки, тест галек или конгломератов, тест обращения, тест переосаждения, тест длинных частиц и др.) можно перенести выводы о среднем направлении намагниченности на направление палеомагнитного поля.

ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ВЕКТОРЫ НА СФЕРЕ

Для описания векторов в трехмерном пространстве принято использовать тройку декартовых координат x , y и z . При рассмотрении векторов на единичной сфере (сфере единичного радиуса), как это принято в палеомагнитологии, декартовые координаты вектора не являются независимыми; они связаны соотношением

$$x^2 + y^2 + z^2 = 1. \quad (1.1)$$

Между декартовыми координатами и аналогом сферических координат на единичной сфере (склонение D , наклонение I и длина R вектора намагниченности) существует следующее соответствие

$$\begin{aligned}x &= R \cdot \cos I \cdot \cos D \\y &= R \cdot \cos I \cdot \sin D \\z &= R \cdot \sin I\end{aligned}\tag{1.2}$$

При рассмотрении векторов на единичной сфере $R \equiv 1$.

Обратное соотношение для определения склонения и наклонения по декартовым координатам вектора [Шипунов, 1993]

$$\begin{aligned}R &= (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2} \\D &= \arccos(x/p) \cdot \text{sign}(y) \\I &= \arcsin(z/R)\end{aligned}\tag{1.3}$$

где $p = (x^2 + y^2)^{1/2}$, а sign – функция, вычисляющая знак числа.

ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ

В палеомагнетизме принято рассматривать векторы намагниченности в двух системах координат: в *древней* (*stratigraphic, tilt corrected*) и *современной* (*geographic, in situ*). *Современная система палеомагнитных координат* описывает расположение вектора намагниченности в пространстве в настоящее время, т.е. направление вектора намагниченности для образца горных пород до его отбора в обнажении. *Древняя система координат* описывает положение вектора намагниченности, которое он занимал в пространстве до изменения положения пласта, например, в результате образования складки. Кроме того, в последнее время для намагниченности, образовавшейся на некоторой промежуточной стадии складкообразования, используется термин *синскладчатая система координат*. В этом случае рассматривается то положение пластов горных пород, при котором образовалась намагниченность. При этом для отдельных объектов палеомагнитного изучения степень завершенности складкообразования к «моменту» образования намагниченности может быть различной (в том числе до- и послескладчатой).

Изменение координат вектора намагниченности при изменении положения пласта определяется вращением пласта с известным расположением оси и угла вращения.

ВРАЩЕНИЕ ВЕКТОРОВ

Вращение векторов в трехмерном евклидовом векторном пространстве описывается с помощью матрицы вращения \mathbf{A} , зависящей от элементов залегания пластов (азимута и угла падения пласта). Между координатами вектора до вращения \mathbf{u} (u_x, u_y, u_z) и координатами вектора после вращения \mathbf{v} (v_x, v_y, v_z) устанавливается соответствие [Бронштейн, Семендяев, 1986]:

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{u}, \quad \mathbf{u} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{v}$$

где \mathbf{A}^{-1} – обращенная матрица. Вращение сохраняет относительную ориентацию любых трех базисных векторов. Элементы матрицы вращения \mathbf{A} определяются через декартовые координаты оси, вокруг которой происходит вращение \mathbf{w} (w_1, w_2, w_3), и угол (δ), на который поворачивается вектор [Корн, Корн, 1984]

$$\begin{aligned}\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \cos(\delta) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (1 - \cos(\delta)) \cdot \begin{bmatrix} w_1^2 & w_1 w_2 & w_1 w_3 \\ w_2 w_1 & w_2^2 & w_2 w_3 \\ w_3 w_1 & w_3 w_2 & w_3^2 \end{bmatrix} + \\ &+ \sin(\delta) \cdot \begin{bmatrix} 0 & -w_3 & w_2 \\ w_3 & 0 & -w_1 \\ -w_2 & w_1 & 0 \end{bmatrix}\end{aligned}\tag{1.4}$$

Ниже приведены формулы для частных случаев вращений, наиболее часто используемых в палеомагнетизме [Шипунов, 1993].

ПЕРЕСЧЕТ ВЕКТОРА ИЗ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ ОБРАЗЦА В СОВРЕМЕННУЮ

$$\begin{aligned}x_G &= x_W \cos \alpha \cos \delta - y_W \sin \alpha - z_W \cos \alpha \sin \delta \\y_G &= x_W \sin \alpha \cos \delta + y_W \cos \alpha - z_W \sin \alpha \sin \delta \\z_G &= x_W \sin \delta - z_W \cos \delta\end{aligned}\quad (1.5)$$

Здесь α и δ – азимут и угол падения маркировки на образце, а индексы W и G – индексы для декартовых координаты векторов в системе координат образца и современной системе координат, соответственно.

ПЕРЕСЧЕТ ВЕКТОРА ИЗ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ В ДРЕВНЮЮ

$$\begin{aligned}x_S &= x_G (\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha \cos \delta) - y_G \sin \alpha (1 - \cos \delta) + z_G \cos \alpha \sin \delta \\y_S &= -x_G \sin \alpha \cos \alpha (1 - \cos \delta) - y_G (\sin^2 \alpha \cos \delta + \cos^2 \alpha) + z_G \sin \alpha \sin \delta \\z_S &= -x_G \cos \alpha \sin \delta - y_G \sin \alpha \sin \delta + z_G \cos \delta\end{aligned}$$

Здесь α и δ – азимут и угол падения пласта, а индексы S и G – индексы для декартовых координаты векторов в древней и современной системах координат, соответственно.

ПЕРЕСЧЕТ ВЕКТОРА ИЗ ДРЕВНЕЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ В СОВРЕМЕННУЮ

Используются формулы предыдущего пункта с изменением знака угла δ .

ПЕРЕВОД СОВОКУПНОСТИ ВЕКТОРОВ К ЦЕНТРУ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ

Используются формулы для пересчета вектора из современной системы координат в древние. Здесь α равно склонению D среднего направления совокупности векторов, а $\delta = I + 90^\circ$, если $I < 0$, и $\delta = I - 90^\circ$, если $I > 0$, где I – наклонение среднего направления совокупности векторов.

ПЕРЕВОД ОТЦЕНТРИРОВАННОЙ СОВОКУПНОСТИ ВЕКТОРОВ К НЕЦЕНТРИРОВАННОЙ

При моделировании совокупности векторов, распределенных в соответствии с законом Фишера $\Phi[D, I, \kappa]$, используется обратная операция для предыдущего пункта. При этом изменяется знак угла δ .

БОЛЬШИЕ И МАЛЫЕ КРУГИ

При описании пространственного расположения совокупности векторов в палеомагнитологии широко используются понятия больших и малых кругов. Так, при рассмотрении двухкомпонентных систем (суммы двух палеомагнитных векторов в различном их соотношении) суммарные векторы будут располагаться вдоль дуги большого круга. С другой стороны, при вращении палеомагнитных векторов при изменении положения пласта горных пород в результате вращения вокруг горизонтальной оси, векторы будут смещаться вдоль дуги малого круга.

Большой круг выражается уравнением [Выгодский, 1973; Halls, 1976; Kirschvink, 1980; Баженов, Шипунов, 1990]:

$$a x + b y + c z = 0, \quad (1.6)$$

где x , y , z – декартовы координаты вектора, a , b , c – координаты нормали к плоскости большого круга.

Малый круг выражается уравнением [Выгодский, 1973; Shipunov, 1997]:

$$ax + by + cz + d = 0, \quad (1.7)$$

где x , y , z – декартовы координаты вектора, a , b , c – координаты нормали к плоскости малого круга. d – расстояние плоскости малого круга от начала координат.

ЛИТЕРАТУРА

В главе использованы следующие работы автора:

- Баженов М.Л., Шипунов С.В. (1990) Метод пересечения дуг большого круга: Анализ и приложения в палеомагнетизме и тектонике плит // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 1. С. 96–103.
- Шипунов С.В. (1993) Основы палеомагнитного анализа: Теория и практика. М.: Наука. 1993. 159 с. (Труды ГИН. Вып. 487)
- Шипунов С.В. (1994) Элементы палеомагнитологии. М.: Геологический институт РАН. 1994. 64 с.
- Шипунов С.В. (1999) Статистика при получении и обосновании палеомагнитных данных // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. М.: Наука. 1999. С. 196-209. (Труды ГИН РАН. Вып. 515)
- Шипунов С.В. (2000) Статистика палеомагнитных данных. М.: Геос. 2000. 80 с. (Труды ГИН РАН. Вып. 527.)
- Шипунов С.В., Алексютин М.В., Левашова Н.М. (1996) Вопросы палеомагнитного анализа. М.: Геологический институт РАН. 1996. 62 с. (Труды ГИН РАН. Вып. 504)
- Shipunov S.V. (1997) Synfolding magnetization: Detection, testing and geological applications // Geophys. J. Int. 1997. Vol. 130. P. 405–410.

Использованная литература:

- Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. (1986) Справочник по математике. М.: Наука, 1986. 544 с.
- Выгодский М.Я. (1973) Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1973. 872 с.
- Корн Г., Корн Т. (1984) Справочник по математике для работников и инженеров. М.: Наука, 1984.
- Петрова Г.Н. (1961) Лабораторная оценка стабильности остаточной намагниченности горных пород. М.: АН СССР. 1961. 104 с.
- Печерский Д.М. (1985) Петромагнетизм и палеомагнетизм. Справочное пособие для специалистов из смежных областей науки. М.: ИФЗ АН СССР. 1985. 128 с.
- Печерский Д.М. (2006) Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности. М.: ИФЗ РАН. 2006. (<http://paleomag.ifz.ru/>)
- Печерский Д.М., Диденко А.Н. (1995) Палеоазиатский океан. Петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М.: ОИФЗ РАН. 1995. 298 с.
- Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А., Писаревский С.А., Погарская И.А., Ржевский Ю.С., Родионов В.П., Слауцитайс И.П. (1982) Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 312 с.
- Halls H.C. (1976) A least-squares method to find a remanence direction from converging remagnetization circles // Geophys. J. R. astr. Soc. 1976. Vol. 45. P. 297–304.
- Kirschvink J.L. (1980) The least-squares line and plane and analysis of palaeomagnetic data // Geophys. J. R. astr. Soc. 1980. Vol. 62. P. 699-718.