

Глава 5. ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ В ПАЛЕОМАГНИТОЛОГИИ

Введение	1
Среднее, кучность, круг доверия	3
Компонентный анализ результатов магнитных чисток	4
Диаграммы Зийдервельда	4
Дополнительные процедуры для оценки направления компонент	8
Кластерный анализ совокупности векторов	10
Селекция выделенных компонент	11
Примеры компонентного анализа и селекции компонент	12
Оценка направления синскладчатой намагниченности	16
Синскладчатая намагниченность	16
Пропорциональное распрямление складки	18
Пересечение малых кругов	19
Доверительная область для пересечения малых кругов	21
Непропорциональное распрямление складки	22
Сравнение методов оценки направления синскладчатой намагниченности	25
Литература	27

ВВЕДЕНИЕ

Результатом работы палеомагнитолога является так называемое *палеомагнитное определение*, т.е. датированное направление палеомагнитного поля с характеристиками его точности. Поэтому необходимыми процедурами палеомагнитного анализа являются – выделение компонент из в общем случае многокомпонентной естественной остаточной намагниченности (NRM) и последующее их датирование. Оценка направления компонент намагниченности осуществляется по результатам *магнитных «чисток»* над палеомагнитными коллекциями.

В результате *лабораторных исследований (лабораторных испытаний)*, заключающихся в проведении *ступенчатых магнитных «чисток»* (чаще всего – нагревами или переменным магнитным полем), палеомагнитолог получает измерения намагниченности для каждого этапа чистки. Таким образом, для каждого палеомагнитного образца имеется последовательность значений вектора намагниченности в декартовых (x, y, z) или сферических (D, I, R) координатах для нарастающих по интенсивности *размагничивающих воздействий*. Эти данные представляют собой основу для выделения компонент одним из методов так называемого *компонентного анализа* и, следовательно, основу для всех дальнейших исследований – как собственно палеомагнитных, так и геологических приложений.

Результаты лабораторных испытаний отображаются графически в виде диаграмм Зийдервельда [Zijderveld, 1967], кривых спада величины намагниченности и на стереопроекциях. При этом иногда говорят, что та или иная компонента намагниченности выделена с помощью (или с использованием) диаграмм Зийдервельда или стереограмм. Это не совсем так. В настоящее время для этого применяют численные методы и используют компьютеры, в частности широко известные и применяемые компьютерные программы Т. Торсвика [Torsvik, 1987], Р. Энкина [Enkin, 1994] и др. Графическое представление в этом случае 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 случае таких различий возможно (но не всегда) разделение компонент намагниченности. Если таких различий нет, то наблюдается так называемая *кажущаяся однокомпонентность*, и направление, по-

лученное для такого вектора, представляет собой некоторую векторную сумму разновозрастных и разнонаправленных компонент намагниченности (в зависимости от вклада той или иной компоненты) и не отражает реального направления геомагнитного поля. В этом случае только последующее применение полевых тестов (см. следующую главу) дает возможность исключить из рассмотрения такой неблагоприятный результат.

В зависимости от сложности компонентного состава намагниченности применяются разные методы выделения компонент (компонентного анализа). В порядке возрастания сложности естественной остаточной намагниченности используются следующие методы.

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

В этом случае можно:

- вычислить аппроксимирующую прямую и определить для нее направление;
- вычислить ту же прямую, зафиксировав ее в начале координат;
- вычислить среднее направление для вектора намагниченности (в том числе и единичной длины) на разных этапах чистки;
- выбрать практически любую величину размагничивающего воздействия и определить для нее направление намагниченности; в силу однокомпонентности намагниченности это направление будет не сильно отличаться от оценок, полученных первыми двумя способами.

2. Две и более компоненты намагниченности.

При *последовательном* (сначала – одна, потом – другая и т.д.) *разрушении различных компонент намагниченности* в процессе магнитной чистки можно:

- вычислить аппроксимирующие прямые для всех последовательных прямолинейных участков и определить для них направления [Kirschvink, 1980];
- вычислить среднее направление для наиболее стабильной (характеристической) компоненты намагниченности (например, высокотемпературной) по измеренным векторам на разных этапах чистки для конечного (однокомпонентного) участка одним из способов для однокомпонентной намагниченности;
- вычислить средние направления для менее стабильных компонент намагниченности по разностным векторам (разрушаемым в процессе магнитной чистки векторам) для каждого прямолинейного участка. Здесь следует отметить, что точность вычисления компонент по разностным векторам – значительно хуже, чем предыдущими способами [Баженов, Шипунов, 1991].

При близких физических свойствах различных компонент намагниченности по отношению к разрушающим воздействиям в некоторых случаях (т.е. для двухкомпонентной намагниченности) можно воспользоваться так называемым *методом пересечения кругов перемагничивания* [Храмов, 1958; Halls, 1976]. Этот метод использует результаты магнитных чисток совокупности палеомагнитных образцов с различающимися элементами залегания пластов и позволяет определить направление наиболее кучной компоненты намагниченности, но оценки, получаемые методом пересечения кругов перемагничивания, могут оказаться смещенными относительно истинных направления [Schmidt, 1985]. В этом случае необходимо учитывать величину возможных при этом систематических ошибок [Баженов, Шипунов, 1990].

Таким образом, 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 при дальнейшей обработке направления выделенных

по разным образцам компонент намагниченности группируются; например, в одной группе могут оказаться компоненты из одного интервала размагничивающих воздействий или компоненты, близкие по направлению (о селекции выделенных в ходе компонентного анализа компонент намагниченности – см. ниже в этой главе).

Каковы дальнейшие процедуры?

Во-первых, могут быть вычислены *средние направления* для каждой группы компонент для всей палеомагнитной коллекции для одного геологического объекта. При этом осредняется внутри- и межпластовый разброс палеомагнитных векторов, связанный, например, с палеогеомагнитными вариациями, ошибками измерений или другими причинами. Кроме того, вычисляют *кучность* (k) распределения выделенных компонентным анализом векторов и *радиус круга доверия* для среднего направления каждой компоненты (α_{95}), характеризующий точность полученного среднего направления. Строго говоря, радиус круга доверия определяет ту область вокруг полученной оценки 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, аналогичный по смыслу кругу доверия для среднего направления намагниченности.

Таким образом, в результате компонентного анализа данных магнитной чистки одной палеомагнитной коллекции могут быть получены направления одной или более компонент естественной остаточной намагниченности NRM. Но для выделенных компонент пока еще не определен возраст (т.е. время их образования). Возраст той или иной компоненты намагниченности может отличаться от возраста самой горной породы в меньшую сторону. Датирование намагниченности обычно производится по отношению к времени какого-либо геологического события, например, времени складкообразования, времени перетолжения 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.

Все эти операции производятся в предположении, что палеомагнитолог имеет дело с однокомпонентной по времени и направлению намагниченностью. При этом вывод (результат оценки направления намагниченности) переносится на направление геомагнитного поля и в рамках гипотезы центрального осевого диполя на тектонические приложения (перемещения и вращения различных блоков земной коры).

СРЕДНЕЕ, КУЧНОСТЬ, КРУГ ДОВЕРИЯ

Среднее направление, кучность и радиус круга доверия оцениваются по хорошо известным формулам (см., например, [Храмов и др., 1982]), известным после появления уже первых работ по статистике палеомагнитных векторов на сфере [Fisher, 1953; Watson, 1956]. Эти параметры вычисляются для совокупности векторов намагниченности, которая полагается (или предполагается) однокомпонентной.

К настоящему времени в этой области палеомагнитного анализа остаются некоторые нерешенные проблемы, значение некоторых из которых для палеомагнитологии, однако, не является принципиальным. Например, широко используемая оценка для кучности векторов $k = (N - 1)/(N - R)$ является смещенной и завышенной. Существует и несмещенная оценка кучности (даже для выборок малого объема) $k = (N - 2)/(N - R)$ [McFadden, 1980]. Однако, она практически не применяется по ряду объективных и субъективных причин (подробности см. в [Шипунов, 2000]). Это, в том числе, связано с тем, что величина кучности является лишь качественной оценкой вида имеющейся совокупности векторов (их рассеяния). Во всех же существующих тестах, где используется кучность, ее величина может быть заменена другим параметром, например длиной суммарного вектора R . Отме-

тим, что сам суммарный вектор для совокупности векторов является *достаточной статистикой* этой совокупности.

Другой параметр, радиус круга доверия, также используется лишь для качественной характеристики среднего вектора, например при качественном сравнении средних направлений двух совокупностей векторов. В математически строгих модификациях полевых тестов, например, в тесте складки для двух крыльев или в тесте обращения, также используются другие параметры (R или угол между средними направлениями двух совокупностей векторов). Поэтому, отмечаемое в [Шипунов, Алексютин, Левашова, 1996] несоответствие (рис. 5.1) используемой оценки радиуса круга доверия и ее формального понимания (с вероятностью 95% истинное направление должно находиться внутри круга доверия), – не является принципиальным.

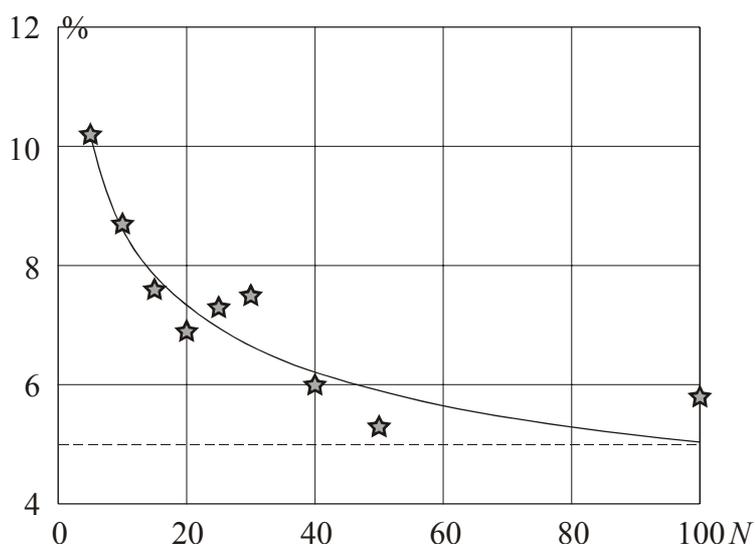


Рис. 5.1. Количество случаев (в %), когда угол между вычисленным средним направлением фишеровской выборки и истинным направлением генеральной совокупности превосходит радиус круга доверия

N – количество векторов в смоделированной выборке (кучность векторов при моделировании $k = 30$). Оценка α_{95} смещена в сторону уменьшения от ее асимптотического поведения для выборок малого объема

Кроме того, оценки кучности и радиуса круга доверия предназначены, строго говоря, для оценки этих параметров только для совокупностей векторов, распределение которых соответствует распределению Фишера [Fisher, 1953]. А так как довольно часто анализируемые совокупности векторов не имеют такого соответствия (или оно не определяется), то эти параметры могут рассматриваться как качественные (не точные) характеристики. Это обстоятельство нивелируется при практическом использовании (например, при различных тестированиях) все более частым применением непараметрических методов (методов, свободных от параметров, т.е. не использующих необходимость соответствия совокупностей векторов распределению Фишера) [Шипунов, 1999; 2000].

КОМПОНЕНТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МАГНИТНЫХ ЧИСТОК

ДИАГРАММЫ ЗИЙДЕРВЕЛЬДА

Как уже сказано в этой главе, основой для получения палеомагнитных определений являются лабораторные испытания (магнитные чистки) коллекций ориентированных образцов, заключающиеся в ступенчатых размагничивающих воздействиях, например, нагревами или переменным магнитным полем (см., например, [Храмов и др., 1982]).

Принципиальная возможность разделения компонент, составляющих суммарную естественную остаточную намагниченность, основана на различии физических свойств несущих намагниченность магнитных минералов к размагничивающим воздействиям. Наиболее часто используемые способы выделения компонент намагниченности – так называемый анализ диаграмм Зийдервельда [Zijderveld, 1967] (выделение линейных участков на диаграммах) и метод пересечения кругов перемагничивания [Храмов, 1958; Halls, 1976] (выделение планарных участков расположения остаточных векторов намагниченности в трехмерном пространстве после каждого шага магнитной чистки).

Ниже будет рассмотрен первый способ анализа на примере магнитной чистки нагревами (второй способ компонентного анализа – пересечение кругов перемагничивания – достаточно полно изложен в цикле работ [Храмов, 1958; Halls, 1976; Schmidt, 1985; McFadden, McElhinny, 1988; Баженов, Шипунов, 1990] и др.).

Существующие в настоящее время методы [Kirschvink, 1980] реализованы в хорошо известных компьютерных программах (например, программы Т. Торсвика [Torsvik, 1987] и Р. Энкина [Enkin, 1994]). Используемые для компонентного анализа процедуры работают, как правило, в интерактивном режиме и требуют выделения компонент намагниченности сначала на глаз (с помощью задания начальной и конечной точек линейных отрезков), а затем оценивают направление компоненты с помощью численных процедур линейной алгебры. Известны также способы автоматической обработки результатов чисток палеомагнитной коллекции [Schmidt, 1982; Kent et al., 1983; McFadden, Schmidt, 1986], основанные на выделении всех возможных компонент и использовании затем статистических критериев для их разбраковки. К сожалению, число шагов магнитной чистки не велико и, как правило, не превышает 20. Кроме того, векторы намагниченности одного образца, измеряемые в ходе магнитной чистки, не являются независимыми величинами. По этим причинам статистические критерии, оперирующие с “независимыми и одинаково распределенными величинами”, являются приближенными, и мало применимы.

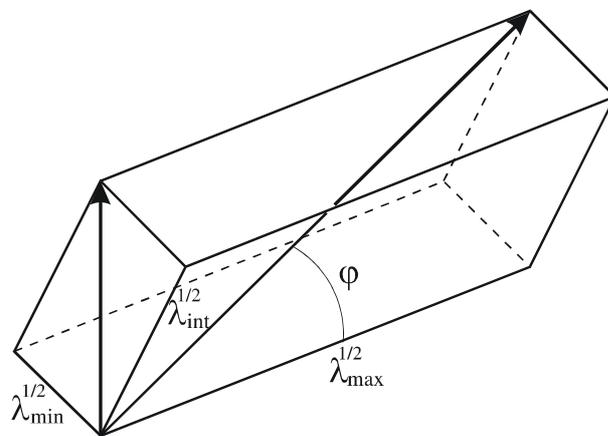


Рис. 5.2. Иллюстрация определения меры разброса исходных данных относительно направления выделенной компоненты

Рассмотрим основные методы выделения компонент. Пусть исходная намагниченность представлена несколькими разнонаправленными компонентами, направления которых требуется определить. Если на некотором интервале размагничивающих воздействий разрушается только одна компонента, *годограф* разрушаемого в процессе магнитной чистки вектора будет представлять прямую в трехмерном пространстве. Задача выделения компонент состоит в выявлении таких прямолинейных отрезков и оценке их направляющих векторов. Такая же картина (прямолинейность *годографа*) может возникнуть и при некотором соотношении спектров размагничивания имеющих разновозрастных (и разнонаправленных) компонент.

Самая первая из предложенных процедур для определения направления разрушаемой компоненты [Kirschvink, 1980] состояла в использовании анализа главных компонент (PCA – Principal Component Analysis). Отметим, что задача нахождения прямой, сумма квадратов перпендикуляров на которую из исходных точек была бы минимальной (т.е. компонентный анализ Киршвинка), была решена К. Пирсоном еще в 1901 г. [Pearson, 1991]. Реализация этого способа на компьютере, например, программой Т. Торсвика (1987) позволяет выделять компоненты исходной намагниченности либо автоматически, определяя все компоненты, удовлетворяющие некоторой заданной заранее точности, либо задавая граничные точки отрезка прямой. При этом визуально не всегда возможно правильно определить границы прямолинейного участка на двух ортогональных проекциях.

В качестве критерия точности выделенной компоненты обычно используют величину максимальной угловой ошибки MAD (Maximum Angular Deviation) [Kirschvink, 1980] – угол φ на [рис. 5.2](#). В работе [Schmidt, 1982] используется модифицированная величина того же параметра. Таким образом, эти параметры характеризуют максимальный разброс исходных данных относительно аппроксимирующей их прямой.

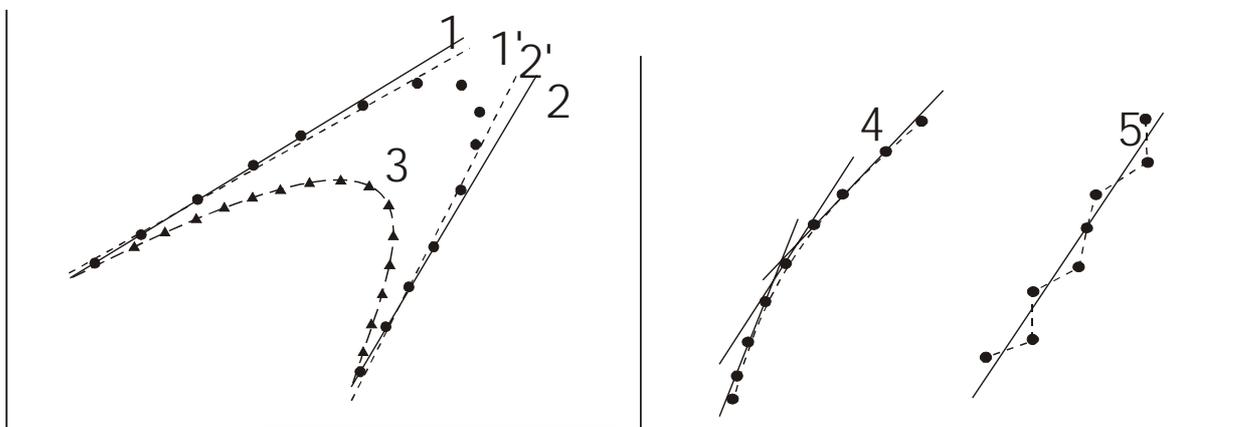


Рис. 5.3. Выделение компонент намагниченности по диаграммам Зийдervельда при различном перекрытии спектров размагничивания

Прямые 1' и 2' дают смещенное относительно истинных направлений (1 и 2) решение вследствие слишком большого значения предварительно заданной угловой ошибки. Для кривой 3 (с теми же истинными направлениями) невозможно оценить истинное направление компонент. При слабой кривизне (кривая 4) возможно выделить компоненты с достаточно хорошей точностью, но их направления не соответствуют истинным. При неточных данных (5) разностные векторы между соседними последовательными точками и компонентами, полученные по непротяженным интервалам размагничивающих воздействий, не отражают истинного направления компоненты намагниченности (определяют ее с большими ошибками)

На автоматически определенное направление заметно сказывается величина задаваемого заранее параметра точности [Schmidt, 1982] (см. [рис. 5.3](#), кривые 1' и 2', на котором проиллюстрирован случай смещенности оценок направления компоненты при неправильном – несколько увеличенном – задании точности). В работе [Schmidt, 1982] предложен метод для обработки однородной палеомагнитной коллекции в целом (Linearity Spectrum Analysis – LSA), использующий характер графиков изменения параметра точности MAD выделенных в процессе магнитной чистки линейных участков для оценки числа компонент в исходной намагниченности, что позволяет точнее оценить границы прямолинейных участков. Основное условие применения этого метода – *палеомагнитная коллекция должна быть однородна по своим свойствам* – сильно ограничивает возможность его применения на практике.

При сильном подобии спектров размагничивания компонент исходной намагниченности, годограф вектора намагниченности может не представлять прямой ни на одном из интервалов размагничивающих воздействий ([рис. 5.3](#), кривые 3 и 4). Это может привести

к тому, что при достаточной густоте измеренных точек “прямые” все равно могут быть выделены для в действительности криволинейных участков, величина угловой ошибки MAD будет достаточно мала (рис. 5.3, кривая 4), но направления полученных компонент будут смещены относительно истинного направления. Поэтому использование величины угловой ошибки MAD не может обеспечить контроля при выделении прямолинейных участков.

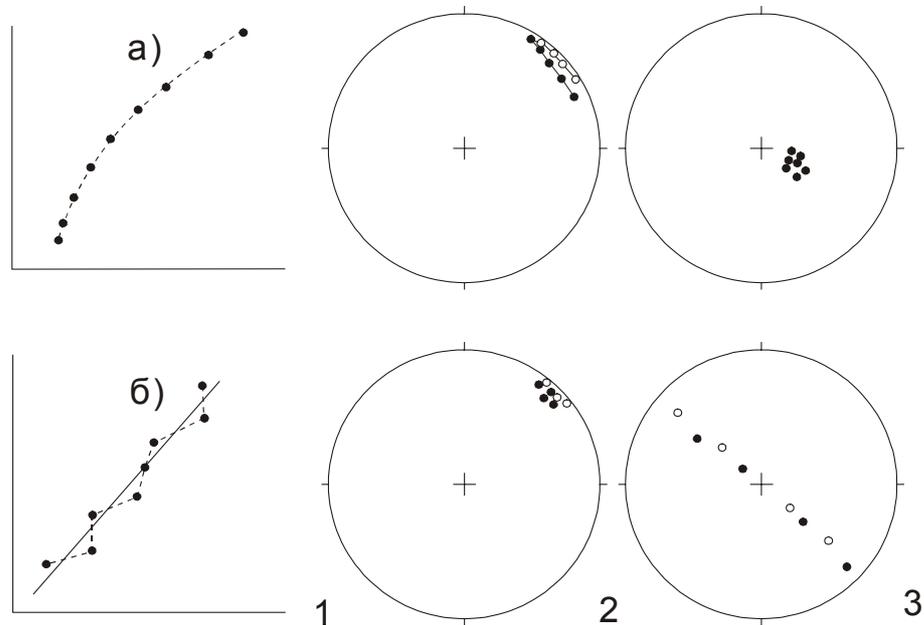


Рис. 5.4. Диаграммы Зийдвервельда (1), соответствующее расположение данных на сфере (2) и распределения векторных произведений к последовательным парам разностных векторов (3) при различном перекрытии спектров размагничивания компонент: (а) – сильное перекрытие спектров размагничивания компонент (точность данных высока); (б) – размагничивается одна компонента (точность данных мала).

Значения намагниченности вдоль третьей координаты приблизительно равна нулю с разбросом, соответствующим разбросу данных в горизонтальной плоскости, представленной на диаграммах.

Заметим, что в последнем случае кривизна¹ годографа разрушаемого вектора имеет один и тот же знак (кривые 3 и 4 на рис. 5.3). Следовательно, этот параметр (кривизна годографа) может быть использован для оценки правильности выделения прямолинейных участков [Kent et al., 1983]. Для действительно прямолинейного отрезка кривой измеренные точки должны располагаться в трехмерном пространстве случайным образом относительно прямой (см. рис. 5.3, прямая 5). Связанными с кривизной годографа являются направления векторных произведений для каждой последовательной пары разностных векторов. Для прямолинейного отрезка распределение таких векторных произведений является случайным в плоскости, перпендикулярной выделенной компоненте (рис. 5.4, б). Напротив, для непрямолинейного участка (т.е. с кривизной постоянного знака) совокупность векторных произведений имеет некоторое предпочтительное направление (рис. 5.4, а).

Другим критерием, определяющим степень прямолинейности годографа на некотором интервале размагничивающих воздействий, может служить аппроксимация проекций измеренных векторов на единичной сфере большим кругом. Для характеристических компонент, т.е. последних высокотемпературных компонент, проходящих через начало координат (в определении [Храмов и др., 1982]), измеренные векторы с некоторым незаконо-

¹ Строго говоря, знак кривизны определен только при рассмотрении кривой в двухмерном пространстве (см., например [Выгодский, 1973]). В данном случае имеется в виду кривизна годографа разрушаемого вектора в проекции на плоскость.

мерным разбросом будут располагаться вокруг истинного направления характеристической компоненты (рис. 5.4, б). Напротив, при наличии криволинейности будет замечен некоторый закономерный тренд, величина которого отражается в величинах собственных чисел для распределения таких векторов (рис. 5.4, а). Поэтому собственные числа λ_{\min} и λ_{int} (или их отношение) могут служить оценкой прямолинейности. Можно также применить для этого критерий равенства собственных значений [Kent et al., 1983]. Подход, предложенный в этой работе, основан использовании меры точности определения вектора компоненты намагниченности для каждого стратиграфического уровня. Это требует значительных изменений методики отбора палеомагнитных коллекций, заключающихся в отборе коллекций много большего объема, чем это делается обычно, включая увеличение количества образцов–дублей на каждом стратиграфического уровня.

Резюмируя сказанное выше можно заключить, что в настоящее время, как правило, не используются критерии для определения “однокомпонентности по направлению” (т.е. подтверждения прямолинейности анализируемых участков годографа), выделенных на некотором интервале размагничивающих воздействий. Используемые в настоящее время параметры точности являются лишь относительными и качественными характеристиками прямолинейности. Следовательно, вполне вероятно, что выделенные компоненты будут являться наложением нескольких разнонаправленных компонент намагниченности. Поэтому важную роль для оценки однокомпонентности выделенных в результате магнитной чистки компонент намагниченности по-прежнему продолжают играть полевые палеомагнитные тесты [Храмов и др., 1982]. Только применение на заключительном этапе палеомагнитных исследований полевых тестов дает возможность в ряде случаев исключить такие ситуации.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРАВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТ

Для определения направления компоненты намагниченности, соответствующей n последовательным шагам магнитной чистки, обычно используется математический аппарат определения главных компонент (см., например [Kirschvink, 1980]). Решение, получаемое на основе собственных векторов, минимизирует некоторую невязку, определяемую схожимостью реальных данных к полученному решению. При этом в качестве минимизируемого параметра могут быть использованы различные метрики (см., например, [Шипунов и др., 1996; Шипунов, 2000]). Решения, основанные на использовании различных метрик, мало различаются, особенно для хороших данных; поэтому применение того или иного способа зависит лишь от пристрастий исследователя, удобства в использовании имеющихся программ и скорости выполнения, заложенных в них алгоритмов. Ниже предлагаются две процедуры [Шипунов, Бретштейн, 1999] оценки направления разрушаемой компоненты, которые в среднем дают аналогичный применяемому в настоящее время методу [Kirschvink, 1980] результат, но требуют значительно меньше вычислительного времени, что важно при обработке палеомагнитных коллекций большого объема.

Отношение стандартных отклонений (SDR - Standard Deviation Ratio). В соответствии с методом наименьших квадратов прямая наилучшего приближения для совокупности точек есть прямая, минимизирующая сумму квадратов расстояний от заданных точек до этой прямой, т.е. сумму квадратов остатков, перпендикулярных этой прямой. Можно показать (см., например [Теннант-Смит, 1988]), что направление этой прямой в трехмерном пространстве определяется относительными величинами стандартных отклонений (квадратный корень из дисперсии относительно среднего) исходных точек по трем координатным осям:

$$s_x = \sqrt{\sum (x_i - x_{\text{cp}})^2}, \quad s_y = \sqrt{\sum (y_i - y_{\text{cp}})^2}, \quad s_z = \sqrt{\sum (z_i - z_{\text{cp}})^2} .$$

Сферические координаты результирующей прямой (т.е. склонение и наклонение разрушенной компоненты намагниченности) находятся обычным приведением вектора из декартовых координат в сферические при условии нахождения решения в одном из квадрантов сферы (для учета знаков декартовых координат).

Анализ разностных векторов (SVA – Subtract Vectors Analysis). Последовательность из n векторов намагниченности, являющихся результатом соответствующего числа шагов магнитной чистки, взаимосвязаны через операцию сложения векторов. Направление разностного вектора между первым и последним измеренными векторами анализируемого интервала размагничивающих воздействий, характеризуя уничтоженную в процессе чистки намагниченность, является средним направлением для $n-1$ последовательного отрезка (это можно показать с помощью криволинейных интегралов для непрерывного случая или простыми рассуждениями относительно среднего направления $n-1$ разностного вектора) и поэтому может быть использовано в качестве оценки направления соответствующей компоненты. Следует отметить, что этот способ, использующий только две крайние точки для каждого рассматриваемого отрезка, не должен обладать высокой точностью (о применении разностных векторов см. например [Баженов, Шипунов, 1991]).

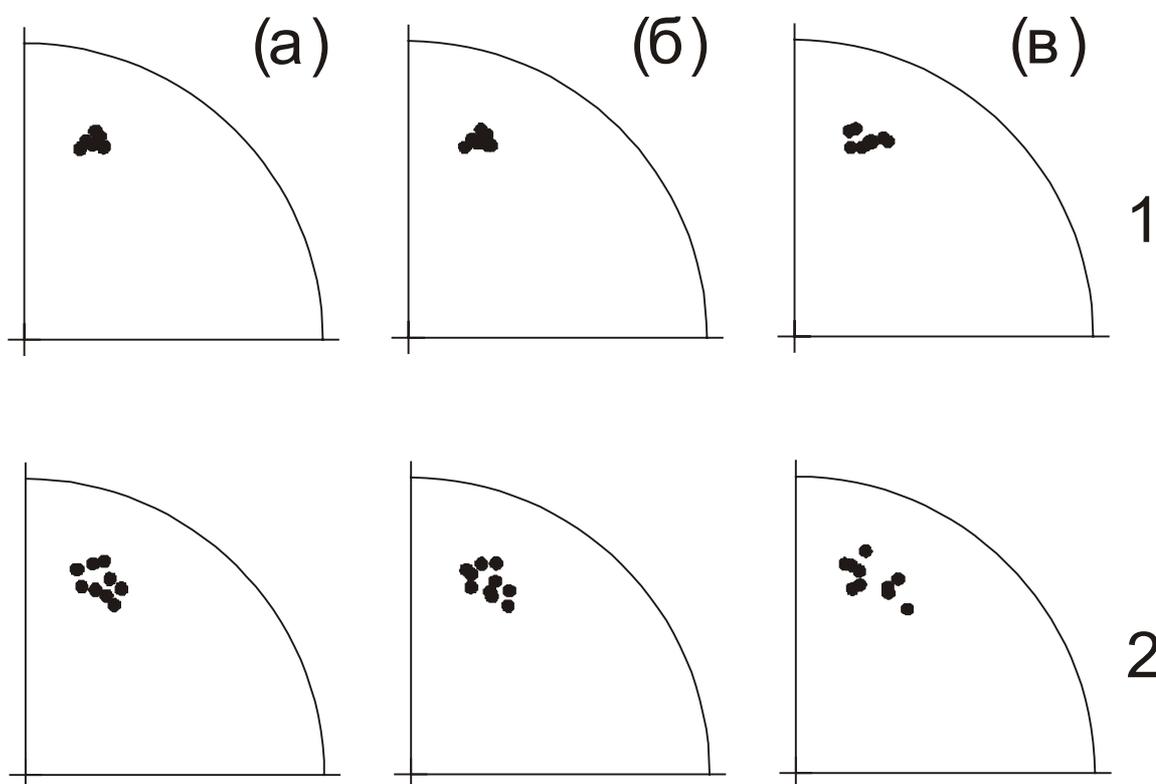


Рис. 5.5. 10 определений направления намагниченности по результатам чистки смоделированных данных: 1 – однокомпонентная намагниченность ($\epsilon = 0.1$), 2 – двухкомпонентная намагниченность ($\epsilon = 0.2$). Способы выделения компонент: (а), (б), (в) – PCA, SDR, SVA соответственно (подробности в тексте)

Для сравнения результатов выделения компонент тремя способами: методом главных компонент (PCA), методом отношения стандартных отклонений (SDR) и методом, использующим разностные векторы (SVA) было выполнено следующее численное моделирование.

Моделировалась однокомпонентная намагниченность с направлением $D = 20^\circ$, $I = 30^\circ$ и двухкомпонентная намагниченность с направлением менее стабильной компоненты $D = 20^\circ$, $I = 30^\circ$ (направление характеристической компоненты в последнем случае не играет

роли). Число шагов чистки в обоих случаях равнялось 6. При этом вектор анализируемой намагниченности (в первом случае – однокомпонентной, во втором – менее стабильная компонента в двухкомпонентной системе) закономерно уменьшался от 1.2 до 0.2 (в условных единицах) с постоянным шагом. В вектор намагниченности на каждом шаге чистки вносилась ошибка: в каждую декартову координату вектора добавлялась равномерно распределенная на отрезке $[-\varepsilon/2, \varepsilon/2]$ ошибка. Величина ε варьировала от 0.05 до 0.2. Таким образом, относительная ошибка определения вектора увеличивалась в процессе чистки; например, при $\varepsilon = 0.2$ ошибка изменялась в ходе чистки в среднем от 8 до 50%.

Было проведено по 10 моделирований при каждом наборе параметров (вид намагниченности - одно- или двухкомпонентная, и величине ε). На рис. 5.5 представлены результаты определения направления компонент тремя способами для однокомпонентной и двухкомпонентной намагниченности.

Для однокомпонентной намагниченности был использован также способ оценки направления компоненты, учитывающий ее прохождение через начало координат, т.е. выделение компоненты, интерпретируемой как характеристической (ChRM). В табл. 5.1 приведены средние направления выделенных компонент и соответствующие статистики по результатам 10 моделирований.

Таблица 5.1. Результаты выделения компонент для модельных примеров

Метод	Однокомпонентная намагниченность							
	$\varepsilon = 0.05$				$\varepsilon = 0.10$			
	<i>D</i>	<i>I</i>	к	α_{95}	<i>D</i>	<i>I</i>	к	α_{95}
PCA	20.2	29.7	3060	0.9	19.5	30.2	1070	1.4
SDR	20.3	29.8	3100	0.8	20.0	30.2	1000	1.5
SVA	19.8	29.7	1890	1.1	20.2	30.2	500	2.1
ChRM	20.0	30.0	14180	0.4	20.0	29.7	3170	0.8
Метод	Двухкомпонентная намагниченность							
	$\varepsilon = 0.10$				$\varepsilon = 0.20$			
	<i>D</i>	<i>I</i>	к	α_{95}	<i>D</i>	<i>I</i>	к	α_{95}
PCA	21.5	29.6	580	1.9	20.4	30.6	205	3.3
SDR	22.0	29.7	590	1.9	21.9	30.9	220	3.2
SVA	22.1	30.0	440	2.3	21.2	30.4	130	4.1

Примечания. Подробности см. в тексте.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать два вывода. 1. Все способы (PCA, SDR, SVA) оценки направления компонент дают сходные результирующие направления. Компоненты, полученные способом SVA, имеют несколько меньшую кучность вокруг истинного направления компоненты. Скорость выполнения двух последних алгоритмов значительно выше. 2. Для однокомпонентной намагниченности, самым точным является алгоритм, учитывающий прохождение годографа через начало координат. Последний, очень важный, вывод можно сформулировать другими словами: если палеомагнитолог уверен, что имеет дело с характеристической компонентой, то лучше определить ее направление с условием прохождения годографа через начало координат (опция O – Origin – в программе Р. Энкина KIRSCH).

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ СОВОКУПНОСТИ ВЕКТОРОВ

В статье [Шипунов, 1988] было предложено использование кластерного анализа для выделения и селекции компонент намагниченности на стадии компонентного анализа.

Совокупность выделенных компонент анализируемой палеомагнитной коллекции разбивается на не имеющие общих точек группы векторов (кластеры) [Шипунов, 1988; 1993].

Для выполнения этой процедуры не требуется выполнение условия сходства границ температурных интервалов компонент. Результатом выполнения такого анализа являются набор кластеров, в каждом из которых оставляются наиболее близкие к центру кластера компоненты, принадлежащие каждому образцу. Процедура кластерного анализа выполняется в обеих координатных системах (в древней и современной). Один кластер, например, в древней системе координат может включать:

1. Доскладчатые компоненты намагниченности, образовавшиеся в геомагнитном поле одного направления.

2. Послескладчатые компоненты намагниченности, образовавшиеся в геомагнитном поле одного направления при незначительных вариациях в элементах залегания пластов.

3. Векторы намагниченности, являющиеся суперпозицией до- и послескладчатой компонент при сравнительно малом содержании вторичной послескладчатой намагниченности и/или при незначительных вариациях в элементах залегания пластов.

4. Случайно сгруппированные векторы.

Первые три случая можно при дальнейшем анализе различить с помощью теста складки (результат применения теста складки для 1, 2 и 3 случаев – намагниченность доскладчатая (1), либо намагниченность послескладчатая (2) и намагниченность является суммой до- и послескладчатой компонент (3) (см., например, [Bazhenov, Shipunov, 1991; Шипунов, 1995a]). Последний случай поддается тестированию с помощью критерия “представительности выборки” [Шипунов, 1993; Шипунов, Лекомцев, Сотников, 2002], который определяет, может ли случайным образом возникнуть кластер данного объема из заданного количества векторов.

Аналогичен ход рассуждений при выполнении кластерного анализа в современной системе координат.

В результате в каждом кластере оставляются наиболее точно определенные компоненты (наиболее близкие к центру кластера) для каждого образца.

Кластерный анализ может быть проведен и на уровне одного образца для всех выделенных компонент намагниченности [Шипунов, Бретштейн, 1999]. В этом случае результатом анализа являются компоненты, наиболее близкие к центрам различающихся между собой кластеров.

СЕЛЕКЦИЯ ВЫДЕЛЕННЫХ КОМПОНЕНТ

После выделения компонент намагниченности обычно производится селекция полученных направлений. Наиболее часто используемыми способами подобной селекции являются:

1) выбор в некоторой степени произвольных, либо основанных на результатах магнито-минералогических исследований, граничных температур, делящих весь используемый температурный интервал, например, на низко-, средне и высокотемпературные участки;

2) селекция по угловой точности выделения каждой компоненты;

3) селекция по геологическим данным (например, по типу породы) или по магнитным свойствам – такого рода селекция сводится к селекции по номерам образцов;

4) кластерный анализ (визуальный или реализованный на компьютере);

5) исключение резко выделяющихся направлений.

Рассмотрим подробнее некоторые виды селекции.

Селекция выделенных компонент по интервалам величин размагничивающего воздействия.

Полученные на предыдущих шагах компонентного анализа совокупности векторов разбиваются на подсовкупности, отвечающие различным интервалам величин размагничивающих воздействий. Такая процедура может быть осуществлена тремя способами.

1. Выбираются компоненты, интервал выделения которых включен в заданный интервал величин размагничивающего воздействия.

2. Выбираются компоненты, интервал выделения которых включает в себя заданный интервал величин размагничивающего воздействия.

3. Выбираются компоненты, интервал выделения которых имеет общие точки с заданным интервалом величин размагничивающего воздействия.

Выбор одного из трех способов селекции по интервалам размагничивающего воздействия зависит от протяженности спектра размагничивания компонент естественной остаточной намагниченности.

Селекция по точности выделенных компонент.

Результатом такой селекции являются наиболее точно определенные компоненты намагниченности для каждого образца.

Обращение векторов к одной полярности.

Могут быть использованы две процедуры обращения, либо, задавая направление, относительно которого производится обращение, либо определяя собственный вектор имеющейся выборки, соответствующий максимальному собственному числу. Результат обращения зависит от используемой системы координат. Поэтому необходимо применение теста складки на заключительной стадии анализа.

Исключение резко отличающихся векторов.

Процедура исключения может быть проведена в одной из координатных систем после предварительного обращения векторов к одной полярности. Так как результат зависит от выбранной системы координат, то анализ выбросов следует проводить в обеих координатных системах, заключая анализ применением теста складки.

Имеется выборка n векторов $x_j (D_j, I_j), j = 1, \dots, n$. Предполагается (или проверяется) соответствие анализируемой совокупности векторов распределению Фишера [Fisher, 1953]. Далее используется следующая итеративная процедура [Афифи, Эйзен, 1982].

1. Для каждого j -того вектора выборки вычисляется выборочный вектор средних R_j и кучность k_j по всем $m = n - 1$ векторам наблюдений, исключая j -тый вектор.

2. Вычисляется угол ϕ_j между x_j и R_j .

3. По формуле $P_j = 1 - \{\exp(k) - \exp(k \cos \phi_j)\} / \{\exp(k) - \exp(-k)\}$ определяется вероятность наблюдать в выборке со средним R_j и кучностью k_j отклонение от центра равное или больше ϕ_j .

4. Если все вероятности P_j больше некоторого заданного заранее значения α (обычно $\alpha = 0.05$), то считается, что в выборке нет выбросов, и процесс останавливается. Если некоторые $P_j < \alpha$, то вектор, соответствующий наименьшему P_j , считается выбросом и исключается из выборки. Далее процедура повторяется для выборки из оставшихся векторов.

Результат исключения выбросов, также как и результат обращения векторов, зависит от используемой системы координат. Поэтому необходимо применение теста складки на заключительной стадии анализа.

ПРИМЕРЫ КОМПОНЕНТНОГО АНАЛИЗА И СЕЛЕКЦИИ КОМПОНЕНТ

Рассмотрим два примера применения комплекса программ SELECT [Шипунов, Бретштейн, 1999], реализующего обсуждаемые выше методы выделения и селекции компонент на реальных палеомагнитных коллекциях.

1. В качестве первого объекта был выбран геологический разрез пермских отложений на мысе Мраморный в Юго-Западном Приморье. В геологическом отношении он представлен толщей переслаивающихся тонких пачек серых полосчатых и белых сахаровидных мраморизованных известняков, кварцево-карбонатно-хлористых сланцев и прослоев кремнистых аргиллитов с многочисленными согласно залегающими телами (силлами) ан-

дезито-базальтовых (диабазовых) порфиритов мощностью от 0.5 до 2 м. Исследованная часть разреза имеет восточное падение с углами падения 35 – 55°.

В данном разрезе при его полевом изучении, в частности, неясным являлся характер внедрения магматических тел – происходило ли оно в процессе последовательного терригенно-карбонатного осадконакопления в горизонтально залегающие толщи или уже после приобретения последними наблюдаемого в настоящее время наклона.

Исходными данными для селекции служили результаты “компонентного анализа результатов термочистки до 600°C, выполненного по стандартной методике”, т.е. выделения компонент с помощью программы Р. Энкина KIRSCH (визуальное выделение прямолинейных участков диаграмм и использование PCA [Kirschvink, 1980]), произведенное Г.З. Гурарием (ГИН РАН), и результаты автоматического выделения всех компонент способами PCA, SDR, SVA и ChRM с помощью комплекса программ. Ниже рассмотрены данные по 93 образцам. На рис. 5.6 выборочно представлены результаты термочистки, позволяющие оценить, насколько хорошие данные были использованы.

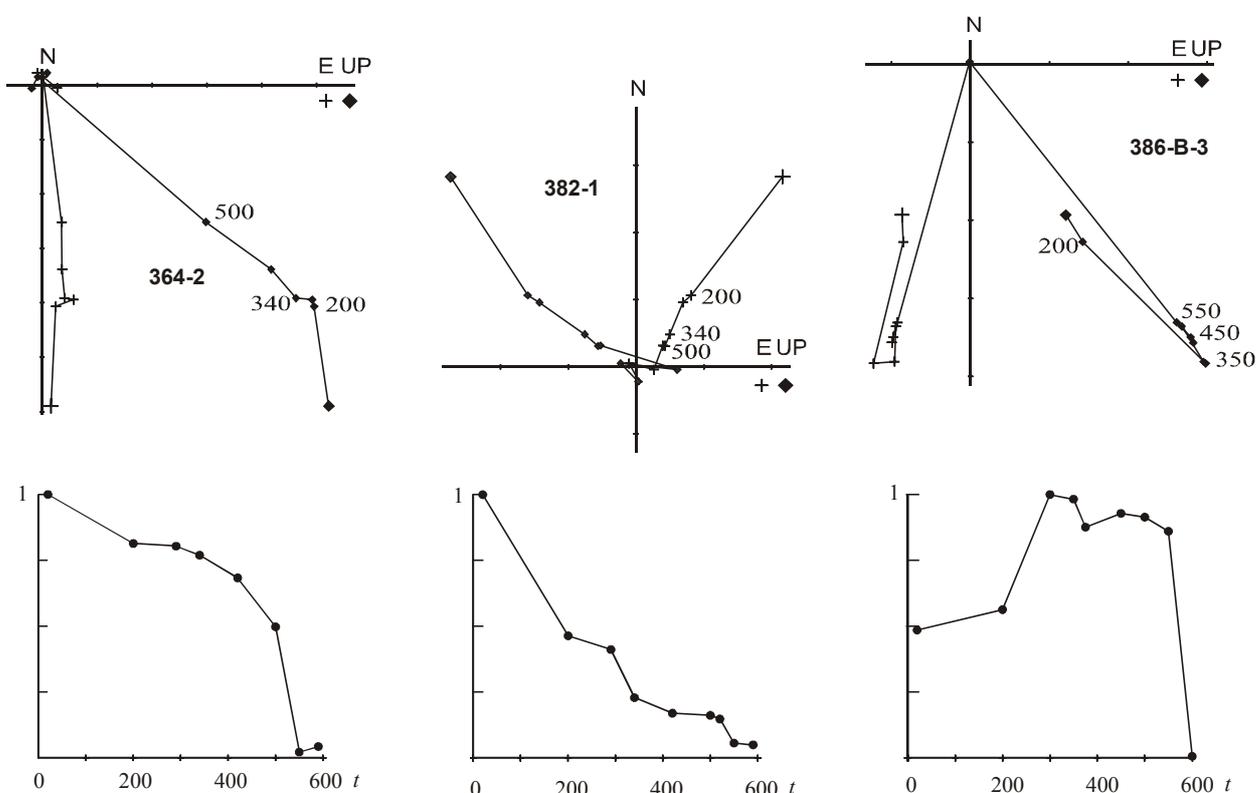


Рис. 5.6. Примеры диаграмм Зийдверельда (вверху) и графиков разрушения исходной намагниченности (внизу) для реальной коллекции

Результирующие компоненты выделены на температурных интервалах (340–550), (290–500) и (375–600) для образцов 364–2 (диабазы), 382–1 (сланцы) и 386–В–3 (известняки), соответственно.

К результирующим совокупностям выделенных таким образом компонент были применены различные процедуры селекции, которые дают согласующиеся между собой результаты. На рис. 5.7 дан пример распределений выделенных компонент намагниченности после некоторых шагов селекции (результат выделения компонент, обращения векторов к одной полярности и исключения резко выделяющихся направлений), а в табл. 5.2 представлены результирующие данные, полученные при использовании однотипной последовательности процедур.

Получение окончательного результата каждой строки в табл. 5.2 (начиная от выделения компонент и заканчивая выполнением тестов складки) с помощью комплекса программ

SELECT, автоматизирующего процесс компонентного анализа, занимает около 10–15 минут рабочего времени. Результат применения теста складки для всех, представленных в табл. 5.2 совокупностей векторов этого примера, отрицателен (т.е. намагниченность – послескладчатая, как для вмещающих, так и для внедренных магматических пород). Поэтому, вероятнее всего, внедрение происходило уже после деформации изученных толщ.

Таблица 5.2. Сравнение результатов различных способов компонентного анализа для реальной коллекции [Шипунов, Бретштейн, 1999]

Вид обработки	<i>n</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>κ</i>	α_{95}	CFT	NFT	RT+FT
PCA+1+2+3	64	8.6	55.1	30.9	3.2	–	–	–
SDR+1+2+3	53	9.1	54.0	30.9	3.5	–	–	–
SVA+1+2+3	71	7.9	54.4	29.1	3.1	–	–	–
ChRM+1+2+3	42	7.4	55.1	32.3	3.9	–	–	–
Enkin+1+2+3	55	7.8	56.0	38.5	3.1	–	–	–

Примечание. Название метода определения направления компонент см. в тексте. Все выделенные компоненты прошли следующие этапы селекции: 1. селекция по точности компонент для каждого образца; 2. приведение к одной полярности в современной системе координат; 3. исключения резко выделяющихся направлений. Тесты складки: CFT – корреляционный тест складки [Bazhenov, Shipunov, 1991], NFT – модификация теста складки из [Шипунов, 1995a]. RT + FT – совместное применение теста обращения и теста складки в модификации из [McFadden, Jones, 1981]. Результат тестирования: (–) – намагниченность послескладчатая. Полу жирным шрифтом выделен результат ручной обработки.

Результаты компонентного анализа представляют совокупность векторов двух полярностей. Кроме того, средние элементы залегания для палеомагнитных образцов разной полярности значительно различаются. Это позволило провести (кроме теста складки) совместное тестирование данных тестом складки и тестом обращения. Пример применения полевых тестов представлен в табл. 5.3.

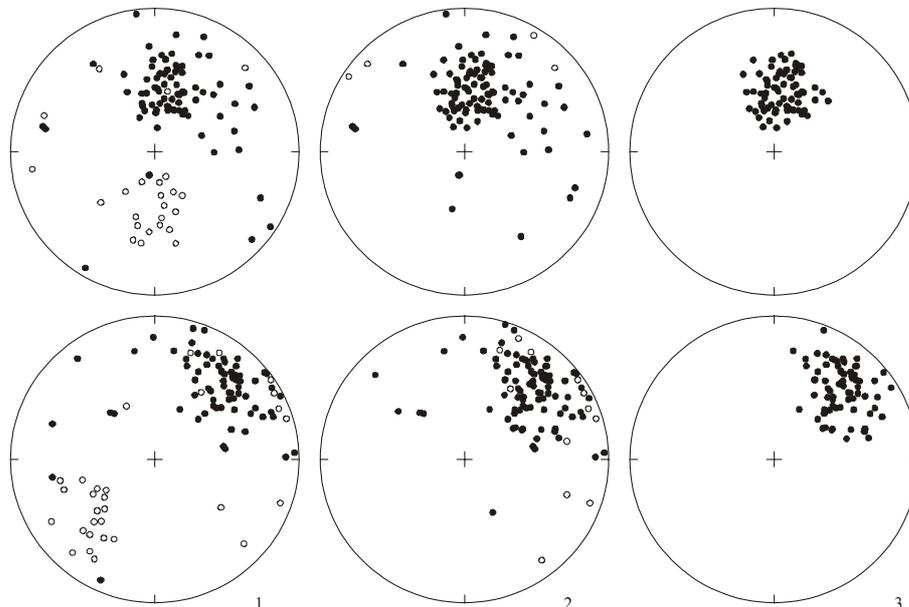


Рис. 5.7. Пример распределений компонент намагниченности в современной (вверху) и древней (внизу) системах координат после шагов селекции: 1 – после определения наиболее точной компоненты для каждого образца; 2 – после приведения векторов к одной полярности; 3 – после исключения резко выделяющихся векторов.

Таблица. 5.3. Результаты совместного применения тестов обращения и складки

Объект	Полярность	n	D	I	κ	α_{95}	F	$F_{\text{крит}}$
Намагниченность в современной системе координат	N	52	10.1	53.9	32.4	3.4	1.50	3.06
	R	19	1.8	55.5	23.1	6.7		
Намагниченность в древней системе координат	N	52	42.4	28.5	22.9	4.1	5.97	3.06
	R	19	48.8	38.8	20.6	7.1		
Элементы залегания пластов	N	52	82.8	42.3	53.1	2.7	7.63	3.06
	R	19	94.7	42.7	115.7	3.0		

Все использованные способы компонентного анализа дают согласующиеся между собой результирующие направления намагниченности (табл. 5.2). Заметим, что совпадение направления среднего вектора, оцененного как для характеристической намагниченности (т.е. с использованием условия прохождения годографа разрушаемого вектора через начало координат), с полученными другими способами результатами свидетельствует в целом об однокомпонентности исходной намагниченности. Это подтверждается распределением начальных и конечных температур прямолинейных отрезков выделенных компонент намагниченности (см. рис. 5.8 для одного из примеров результирующих данных). Начальная температура выделения результирующих компонент намагниченности в основном 20 и 200°C, а конечная температура распределена в интервале 350–550°C, т.е. эти компоненты, используя термины обычно применяемой селекции по температурам выделения, могут быть названы низко-, средне- и высокотемпературными.

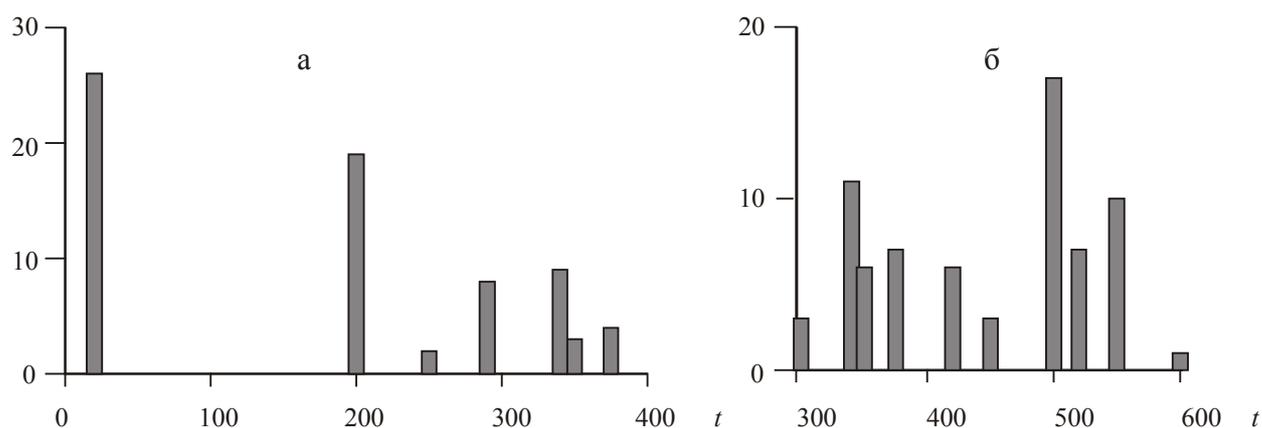


Рис. 5.8. Пример распределения начальных (а) и конечных (б) точек температурных интервалов для компонент намагниченности, вошедших в результирующую статистику.

2. Второй пример, использующий опубликованные палеомагнитные данные по Пенжинскому району Северо-Востока России [Алексютин, Шипунов, 1997], будет рассмотрен менее подробно. В результате компонентного анализа 8 образцов, проведенного по программе Р. Энкина KIRSCH, выделена доскладчатая компонента намагниченности. Применение автоматизированного комплекса программ было произведено в следующей, отличающейся от обработки данных предыдущего примера, последовательности (табл. 5.4). Сначала было проведено выделение всех возможных компонент намагниченности для каждого палеомагнитного образца. Затем все векторы приводились к одной полярности, и была произведена отбраковка резко выделяющихся направлений. Наконец, для каждого образца была оставлена наиболее точно определенная компонента намагниченности и направления компонент, полученные для образцов-дублей, были осреднены. Результирующие средние направления намагниченности незначимо отличаются при разных способах выделения компонент и от результата ручной обработки. Отметим, что, как и для первого примера не применялась селекция по температурным интервалам выделенных компонент,

однако температурный интервал, соответствующий результирующей компоненте намагниченности, составлял 300 – 500°C (конечная температура чистки из-за малой величины оставшейся намагниченности – 500°C).

Таблица 5.4. Сравнение результатов различных способов компонентного анализа для реальной коллекции [Алексютин, Шипунов, 1997]

Вид обработки	<i>n</i>	<i>D</i>	<i>I</i>	<i>κ</i>	α_{95}	CFT	NFT
PCA+2+3+1+4	7	146.4	77.6	97.4	5.9	+	+
SDR+2+3+1+4	8	151.4	74.9	172.4	4.1	+	+
SVA+2+3+1+4	7	147.9	74.2	165.4	4.5	+	+
ChRM+2+3+1+4	7	127.5	82.2	258.9	3.6	+	+
Enkin+1+2+3	5	141.0	83.0	94.3	6.5	+	+

Примечание. Название метода определения направления компонент см. в тексте. Все выделенные компоненты прошли следующие этапы селекции: 1. селекция по точности компонент для каждого образца; 2. приведение к одной полярности в современной системе координат; 3. исключения резко выделяющихся направлений; 4. вычисление средних по образцам–дублям. Тесты складки: CFT – корреляционный тест складки [Bazhenov, Shipunov, 1991], NFT – модификация теста складки из [Шипунов, 1995a]. Результат тестирования: (+) – намагниченность доскладчатая. Полуужирным шрифтом выделен результат ручной обработки.

Результат автоматизированной обработки (табл. 5.4) включал данные по 7 – 8 образцам (в отличие от результата ручной обработки, при которой удалось выделить результирующую компоненту намагниченности лишь в 5 образцах). Кучность результирующего распределения векторов намагниченности при автоматизированной обработке выше кучности при ручной обработке, а среднее направление более точное. Результаты применения различных модификаций теста складки положительны (результирующая компонента намагниченности – доскладчатая).

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ СИНСКЛАДЧАТОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

СИНСКЛАДЧАТАЯ НАМАГНИЧЕННОСТЬ

В последнее десятилетие все большее значение в тектонике приобретают палеомагнитные данные, являющиеся подчас единственными данными, позволяющими количественно интерпретировать взаимные перемещения и вращения различных блоков земной коры. Основой для тектонических приложений палеомагнитологии являются палеомагнитные направления первичной или *доскладчатой* компоненты намагниченности для разновозрастных геологических образований [Храмов и др., 1992]. Трудности выделения и датирования древних компонент естественной остаточной намагниченности (NRM) общеизвестны (см., например [Шипунов, 1993]).

В ряде случаев для тектонических построений возможно использование вторичных, *послескладчатых* компонент NRM. В этом случае необходимо оценить возраст намагниченности независимым способом, так как с помощью применяющихся для датирования компонент намагниченности различных модификаций теста складки возможно определение только послескладчатости намагниченности, а значит нижней оценки ее возраста.

Так, например, для верхнерифейских пород Кольского п-ова [Шипунов, Чумаков, 1991] в отложениях кильдинской и волоковой серий выделена, кроме доскладчатой и, по-видимому, близкой к первичной компоненты намагниченности – послескладчатая компонента. Оценка ее возраста произведена по возрасту надвига и других деформаций отложений рыбачинского комплекса, которые являются результатом байкальской складчатости, завершившей развитие Тиманской зоны. Возраст этой складчатости, оцененный по изотопным K–Ar датировкам (650 млн. лет) синтетектонических даек долеритов п-ова Варангер

[Kjode, 1980; Kjode et al., 1978], дает нижнюю границу времени образования послескладчатой компоненты намагниченности. Направление послескладчатой намагниченности соответствует направлению намагниченности датированных даек п-ова Варангер. Эта компонента – древняя, не совпадающая ни с современным, ни любым другим известным фанерозойским палеомагнитным направлением [Храмов и др., 1982]. Интерпретация этого направления как результат вращения не подтверждается геологическими данными [Негруца, 1971]. Таким образом, остается одна возможность – считать выделенную послескладчатую компоненту NRM – древней, и оценивать ее возраст в 650 млн. лет.

Совместно с другими полученными для Балтийского щита палеомагнитными данными этот результат используется для построения докембрийской [Elming et al., 1993] и палеозойской [Torsvik et al., 1992] ветвей миграции палеомагнитного полюса, которые интерпретируются в виде широтного движения Балтийского щита и его вращений по отношению к географической сетке.

В последние двадцатилетие во множестве палеомагнитных исследований стало фигурировать понятие *синскладчатой намагниченности* [McClelland Brown, 1983; Kent, Updike, 1985; Miller, Kent, 1986; McCabe, Elmore, 1989; Surmont et al., 1990], т.е. намагниченности, возникшей на некоторой промежуточной стадии складкообразования. И ее все чаще стали привлекать для тектонических целей (см., например [Шипунов, 1995б; Shipunov, 1997; Алексютин, Шипунов, 1997; Шипунов, 1998; Пучков, 2000; Niitsuma et al., 2003; Henry et al., 2004; Elmore et al., 2006; Waldhör, Appel, 2006]). Однако, здесь также существует известная трудность, заключающаяся в невозможности отличить синскладчатую намагниченность от суммы двух компонент (до- и послескладчатой). В этом случае результаты применения корректных модификаций теста складки могут интерпретироваться двояким образом, что вызвано приблизительно одинаковой картиной, наблюдающейся для этих двух случаев.

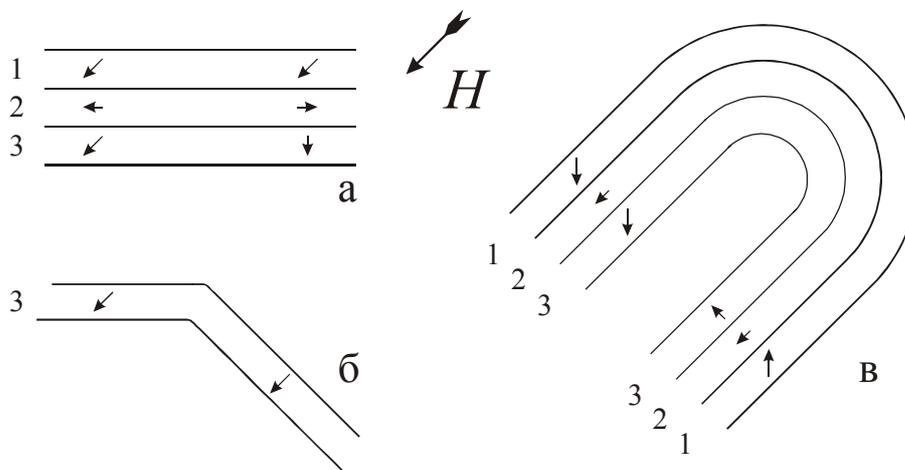


Рис. 5.9. Пример соотношений векторов намагниченности на различных этапах складчатости

а – первичное горизонтальное залегание слоев (древняя система координат), б – промежуточный этап складкообразования (синскладчатая система координат), в – слои после завершения складкообразования (современная система координат). 1, 2 и 3 – пласты, намагниченные до складкообразования, после складкообразования и на промежуточной стадии складкообразования, соответственно (стрелками показаны направления намагниченности в различных системах координат. H – направление геомагнитного поля.

Случай суммы двух компонент, как таковой, без дополнительных попыток их разделения, вообще не может использоваться для тектонических построений. Направления намагниченности, которые можно получить при этом, фиктивны и не отражают истинного направления геомагнитного поля, существовавшего в это время (до, во время или после складкообразования).

Кроме того, используемые до настоящего времени методы получения предположительно синскладчатой намагниченности – некорректны. Обычно применяемая для этого процедура состоит в пропорциональном распрямлении крыльев складки и определении такой стадии распрямления, на которой в некотором смысле удовлетворяются желательные предположения, например, стадия, на которой кучность распределения изучаемых палеомагнитных векторов максимальна (см., например [Miller, Kent, 1986; McFadden, 1990; Watson, Enkin, 1993]).

Правильность подхода пропорционального распрямления складки никем ранее не обосновывалась. Более того, исходя из общих соображений трудно представить, что процесс складкообразования (наклон крыльев складки) во времени происходил пропорционально для разных крыльев. При применении такого подхода необходимо обосновать, что складкообразование во времени действительно происходило пропорционально. В любом случае, даже при действительном существовании в изучаемых горных породах синскладчатой намагниченности, полученное при пропорциональном распрямлении направление намагниченности не будет истинным, и будет содержать систематические погрешности. Величина угловых ошибок, зависящая от степени непропорциональности процесса деформации пластов горных пород и от пространственного взаимоотношения истинных направлений синскладчатой намагниченности и элементов залегания пластов, может быть легко оценена в каждом конкретном случае.

Из рис. 5.9, на котором представлены направления различных компонент намагниченности (до-, после- и синскладчатой – пласты 1, 2 и 3 соответственно) для изоклиальной складки, видно, что векторы до- и послескладчатой намагниченности параллельны для крыльев складки в древней (рис. 5.9, а) и современной (рис. 5.9, в) системах координат соответственно. Направления синскладчатой намагниченности для крыльев складки различаются в обеих системах координат. Их параллельность наблюдается только на некоторой промежуточной стадии складкообразования – в *синскладчатой системе координат* (рис. 5.9, б).

В работах [Bazhenov, Shipunov, 1991; Шипунов, 1995а] предложено использовать различные варианты теста складки (корреляционный тест (CFT) складки и модификацию теста складки (NFT), анализирующую кучности распределений палеомагнитных векторов, для тестирования синскладчатости намагниченности.

Здесь же делается попытка преодоления рассмотренных трудностей (некорректности методики получения направления синскладчатой намагниченности путем пропорционального распрямления складки и невозможности отличить синскладчатую намагниченность от суммы до- и послескладчатой компонент), а также предлагается способ, позволяющий проследить последовательность складкообразования в пространстве и во времени.

ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЯМЛЕНИЕ СКЛАДКИ

Основной задачей палеомагнитных исследований является определение направления древнего геомагнитного поля, что предполагает знание системы координат, в которой произошло образование намагниченности пород.

Обычно применяемый способ для определения направления синскладчатой намагниченности и стадии складкообразования, на которой она возникла, использует ступенчатое распрямление складчатых структур от современного положения пластов до первично горизонтального – и нахождение той степени распрямления (или стадии деформации), где достигается, например, максимальная кучность векторов намагниченности. Пропорциональность распрямления складчатых структур (в процентах к современным углам падения всех пластов) соответственно предполагает пропорциональность процесса деформации. Очевидно, что это предположение выполняется далеко не всегда. Современные углы падения крыльев геологической структуры представляет собой лишь конечный продукт

процесса деформации, при этом в момент перемагничивания разные части структуры могли быть затронуты деформацией в разной степени [Николя, 1992].

Если рост складки в действительности не пропорционален, то использование процедуры пропорционального распрямления складки может дать неверную оценку направления синскладчатой намагниченности, а оценка степени деформации в процентах (равная для всех пластов) является некоторой усредненной для разных частей складчатой структуры величиной. Некорректность применения процедуры пропорционального распрямления складки отмечалась уже в самых ранних работах по изучению синскладчатой намагниченности [McClelland Brown, 1983], однако до сих пор этот подход применяется в подавляющем большинстве палеомагнитных работ.

ПЕРЕСЕЧЕНИЕ МАЛЫХ КРУГОВ

Известно, что при пересчете между древней и современной системами координат вектор намагниченности описывает некоторую дугу малого круга, длина которой равна углу падения слоев в месте отбора данного пласта [McClelland Brown, 1983; Kirschvink, 1985]. Тогда если изучаемая компонента намагниченности – синскладчатая, то ее направление, соответствующее реальному направлению истинного геомагнитного поля в момент образования намагниченности на некоторой стадии складкообразования, должно лежать на дуге этого малого круга. Если одна и та же компонента синскладчатой намагниченности присутствует в породах с различными залеганиями, то предположив, что синскладчатая намагниченность образовалась в один и тот же «момент» времени для всех пластов и, значит, имеет одно направление, можно оценить среднее направление этой намагниченности по пересечению дуг малого круга (находится где-то в области сгущения («пересечения») малых кругов и может быть оценено путем минимизации невязки, определяемой суммой квадратов расстояний от искомого направления до каждого малого круга [Shipunov, 1997]) (см. рис. 5.10). При этом отсутствует какое-либо предположение о пропорциональности процесса складкообразования.

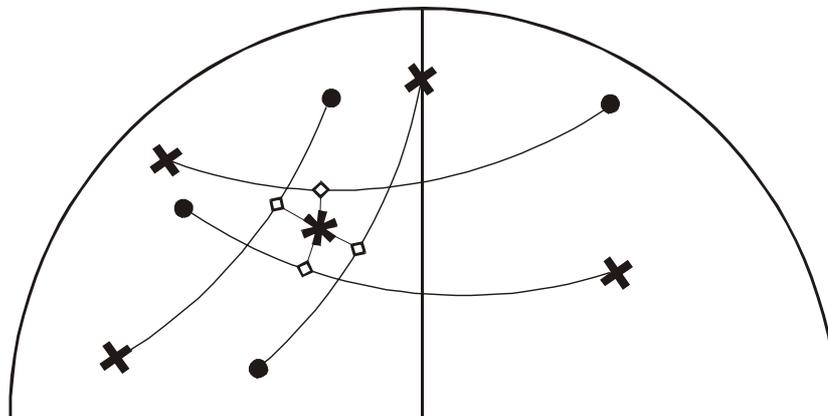


Рис. 5.10. Пример расположения малых кругов на стереографической проекции для случая синскладчатой намагниченности. Кресты и кружки – направления намагниченности в современной и древней системе координат соответственно, звездочка – вычисленное среднее направление синскладчатой намагниченности, малые квадраты – направления синскладчатой намагниченности для образцов.

Это можно осуществить с помощью метода наименьших квадратов, минимизирующего сумму квадратов отклонения искомого направления от каждого малого круга

$$S = \sum (a_i x + b_i y + d_i)^2 \rightarrow \min$$

Здесь a , b – направление нормали (склонение и наклонение) к i -тому малому кругу, d – расстояние i -того малого круга от начала координат, а x , y – декартовы координаты иско-

мого направления синскладчатой намагниченности. Третью декартову координату искомого решения z получают из условия нахождения решения на единичной сфере $x^2+y^2+z^2 = 1$. Решение этой задачи сводится к стандартным численным процедурам линейной алгебры [Уилкинсон, Райнш, 1976].

Таблица 5.5. Палеомагнитные данные для примера синскладчатой намагниченности [Miller, Kent, 1986]

Объект	λ	φ	A	B	D_s	I_s	D_g	I_g	D_{syn}	I_{syn}	$f, \%$
К	76.33	41.09	168	36	167.2	-7.2	167.3	28.8	167.2	-7.2	3
L	76.28	41.09	164	35	169.4	-15.2	169.5	19.5	169.3	-8.2	23
M	76.12	41.11	346	40	15.3	7.1	151.1	-31.9	153.3	-8.5	43
N	76.00	41.13	347	40	163.0	10.6	162.4	-29.5	163.0	-8.4	50
O-P	76.16	40.99	156	18	172.3	-9.1	172.2	8.2	172.3	-8.1	11
Q	76.16	40.99	155	24	167.1	-15.7	166.8	7.9	166.8	-8.9	33
R	76.16	40.99	164	53	172.6	-11.5	175.4	40.8	172.5	-8.5	8
S	75.95	41.06	153	17	166.2	-0.9	166.7	15.8	166.2	-0.9	6
T	75.92	41.15	349	41	170.5	10.2	170.7	-30.8	170.5	-8.8	49
Среднее			151*	-82*	166.7	-3.6	166.9	3.5	166.8	-7.5	
к			5.0*		44.8		8.5		161.9		
α_{95}			20.9*		7.8		18.7		3.7		

Примечание. λ , φ – долгота и широта места отбора. A , B – азимут и угол падения пластов. D , I – склонение и наклонение намагниченности. Системы координат: s – древняя, g – современная, syn – синскладчатая. f – степень завершенности складчатости. к, α_{95} – кучность и радиус круга доверия для среднего направления. * – среднее вычислено для нормалей к пластам.

Переходя затем к сферическим палеомагнитным координатам, получают оценку среднего направления (склонения D и наклонения I) вектора предполагаемой синскладчатой намагниченности. Кроме оценки направления предположительно синскладчатой намагниченности может быть произведена интервальная оценка для полученного решения, являющаяся аналогом 95%-ного круга доверия для среднего направления фишеровской выборки [Поллард, 1982; Шипунов и др., 1996; Шипунов, 2000]. Используя полученное направление можно определить распределение векторов синскладчатой намагниченности. За оценку такого распределения можно взять проекции полученного методом наименьших квадратов среднего вектора на каждый из малых кругов (малые квадраты на рис. 5.10). Кучность этого распределения не будет истинной – она завышена. Для определения времени возникновения этой полученной компоненты (образовалась ли она на какой-либо стадии складкообразования, или полученный результат есть следствие наложения до- и послескладчатой компонент намагниченности) необходимо провести соответствующее тестирование (см. следующую главу).

В табл. 5.5 и 5.6 приведены примеры оценивания направления синскладчатой намагниченности для двух совокупностей реальных данных. Кучности совокупностей векторов в синскладчатой системе координат, при этом, значительно превосходят таковые в до- и послескладчатой системах координат. Результат применения теста «синскладчатости» не противоречит предположению о синскладчатом возрасте анализируемой компоненты намагниченности. Более подробное рассмотрение этих примеров см. в Главах 6 и 8.

В первом примере [Miller, Kent, 1986], данные которого представляют два крыла небольшой складки с разбросом объектов на 20 км. Для более крутого крыла складки (с северными падениями пластов) степень завершенности складчатых деформаций составляет в среднем около 50 %. Для второго крыла складки – около 15 %.

Таблица 5.6. Палеомагнитные данные для примера синскладчатой намагниченности [Шипунов, 1991]

Разрез	λ	φ	A	B	D_s	I_s	D_g	I_g	D_{syn}	I_{syn}	$f, \%$
Миньяр	57.4	55.0	10	15	51	33	60	44	51	33	0
Волково	57.5	54.9	148	39	57	29	38	22	49	28	39
Инзер	57.6	54.3	30	16	38	10	39	26	39	26	100
Толпарово 1	57.1	54.2	288	84	63	36	66	-30	63	36	0
Толпарово 2	57.2	54.1	114	37	12	30	356	17	12	30	0
Катав-Ивановский	58.3	54.7	156	59	74	31	42	22	50	28	69
Среднее			148*	12*	49	30	39	19	44	31	
к			3.3*		15.0		6.0		28.2		
α_{95}			83.7*		14.8		23.4		10.8		

Примечание. См. предыдущую таблицу.

Во втором примере [Шипунов, 1991], объекты которого занимают значительную площадь (расстояние между объектами до 100 км), полученные величины степени завершенности складчатой деформации не противоречат результатам применения теста складки на локальном уровне [Шипунов, 1991; Шипунов, 1995б].

ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ ДЛЯ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ МАЛЫХ КРУГОВ

Пусть имеется m объектов палеомагнитного исследования с различающимися элементами залегания пластов, для которых тем или иным способом получены направления анализируемых компонент намагниченности в стратиграфической и географической системах координат. Заметим, что все рассматриваемые малые круги образованы при пересчете палеомагнитных векторов между различными системами координат и, следовательно, нормали к этим кругам всегда горизонтальны. Пусть $D_s, I_s, \kappa_s, \alpha_{95s}$ и $D_g, I_g, \kappa_g, \alpha_{95g}$ – средние направления векторов, кучности и радиусы круга доверия для каждого из m объектов в соответствующей системе координат.

Для нахождения наилучшего пересечения малых кругов используются средние направления векторов намагниченности для разрезов [Шипунов, 1995б]. Для определения доверительной области для этого пересечения будем также использовать соответствующие α_{95} .

Моделируя много раз векторы намагниченности для каждого из объектов, например из распределения Фишера с параметрами $\Phi(D_s, I_s, \kappa_s)$ и $\Phi(D_g, I_g, \kappa_g)$ и выбирая только те векторы, которые попадают в соответствующий круг доверия, каждый раз выполняем с ними процедуру поиска пересечения малых кругов [Шипунов, 1995б]. Таким образом получим облако возможных решений при выполнении условия, что все исходные векторы намагниченности принадлежат доверительным областям для имеющихся средних направлений намагниченности. Заметим, что можно для той же цели моделировать и другие распределения векторов, например с равномерное распределение в круге доверия, так как важно определить лишь границу доверительной области.

Проиллюстрируем справедливость такого подхода на следующем примере. Пусть по имеющемуся среднему направлению намагниченности (D, I), кучности κ и радиусу круга доверия α_{95} необходимо определить координаты палеомагнитного полюса и его овал доверия. Координаты полюса и овал доверия обычно вычисляются по хорошо известным формулам (см., например: [Храмов и др., 1982]).

Для определения овала доверия также можно использовать метод Монте-Карло. Достаточно много раз смоделировать вектор из распределения $\Phi(D, I, \kappa)$, попадающий в круг доверия (угловое расстояние от которого до используемого при моделировании генерального среднего не больше α_{95}), и вычислить для него координаты полюса. Проведя подобную процедуру много раз, получим область возможных решений, которая с вероятностью 95% содержит истинные координаты палеомагнитного полюса. Для получения стандартных характеристик этой области (радиусов овала доверия Θ_1 и Θ_2) можно аппроксимировать полученную область неосесимметричным распределением, т.е. решить задачу на собственные векторы (см., например: [Шипунов, 1993]) и оценить максимальные отклонения координат палеомагнитного полюса от собственного вектора \mathbf{T}_1 , определяющего среднее положение полюса, по направлению к векторам \mathbf{T}_2 и \mathbf{T}_3 . Эти максимальные значения при достаточно большом объеме моделирования являются оценками Θ_1 и Θ_2 .

Аналогичные операции проводятся при определении области доверия и соответствующих радиусов для пересечения малых кругов.

Процедура оценки доверительной области

Имеются $(D, I, \kappa, \alpha_{95})_{lj}$, где $l = 1, \dots, m$ (m – количество объектов), а j – индекс, определяющий систему координат (j может быть либо s , либо g).

1. Моделируются направления $(d, i)_j$, попадающие в соответствующий круг доверия.
2. Ищется пересечение m малых кругов [Шипунов, 1995б]. Решение $(d, i)_{\text{syn}}$ – запоминается.

Шаги 1 и 2 повторяются много раз, например $M = 1000$. В результате получают M векторов $(d, i)_{\text{syn}}$, облако расположения которых задает доверительную область для пересечения малых кругов.

3. Определяются три собственных вектора для полученной области точек $(d, i)_{\text{syn}}$: $\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3$, соответствующие трем собственным числам $\tau_1 > \tau_2 > \tau_3$. \mathbf{T}_1 является еще одной возможной оценкой направления синскладчатой намагниченности.

4. Определяются проекции векторов $(d, i)_{\text{syn}}$ на оси \mathbf{T}_2 и \mathbf{T}_3 . Результат – два массива чисел.

5. Определяются максимальные по абсолютной величине значения этих двух массивов проекций. Результат – два числа, являющихся синусами углов, которые определяют максимальный и минимальный радиусы овала доверия для направления пересечения малых кругов.

НЕПРОПОРЦИОНАЛЬНОЕ РАСПРЯМЛЕНИЕ СКЛАДКИ

Процедура оценки направления синскладчатой намагниченности, которая по аналогии с ныне применяемым для этого методом, может быть названа *непропорциональным распрямлением складки*, так же как и процедура пропорционального распрямления, базируется на следующем предположении: в системе координат, соответствующей той стадии деформации каждого пласта, на которой возникла изучаемая компонента намагниченности, направления этой компоненты для различных частей структуры должны различаться статистически неразличимо.

Метод непропорционального распрямления [Шипунов и др., 1996; Левашова и др., 1997; Левашова и др., 1999] складки сводится к поиску положений каждой приблизительно моноклиальной части структуры (крыльев складки), при которых наблюдается наибольшая сходимость векторов намагниченности для различных частей складчатой структуры (например, максимальная кучность векторов намагниченности). Если намагниченность возникла до или после складкообразования, наилучшая сходимость данных должна достигаться в древней или в современной системе координат, соответственно (рис. 5.11). В этом случае результат применения нового метода аналогичен результату других корректных модификаций теста складки. Если намагниченность возникла на некоторой про-

межуточной стадии складкообразования, наилучшая сходимость данных должна достигаться в системе координат, в которой была приобретена намагниченность. При этом не предполагается пропорциональность процесса деформации, и стадии деформации для различных частей структуры могут оказаться различающимися.

Таким образом, задача сводится к поиску экстремума многомерной функции, определяющей степень сходимости данных. В качестве функции, экстремум которой должен быть найден, кроме кучности векторов может быть использована любая из статистик, применяемых в различных модификациях теста складки, например, величина F -критерия [McFadden, Jones, 1981], коэффициент корреляции [Баженов, Шипунов, 1988], наибольшее собственное значение ориентационной матрицы τ [Tauxe, Watson, 1994]. Для краткости, в дальнейшем будет использоваться только F -критерий.

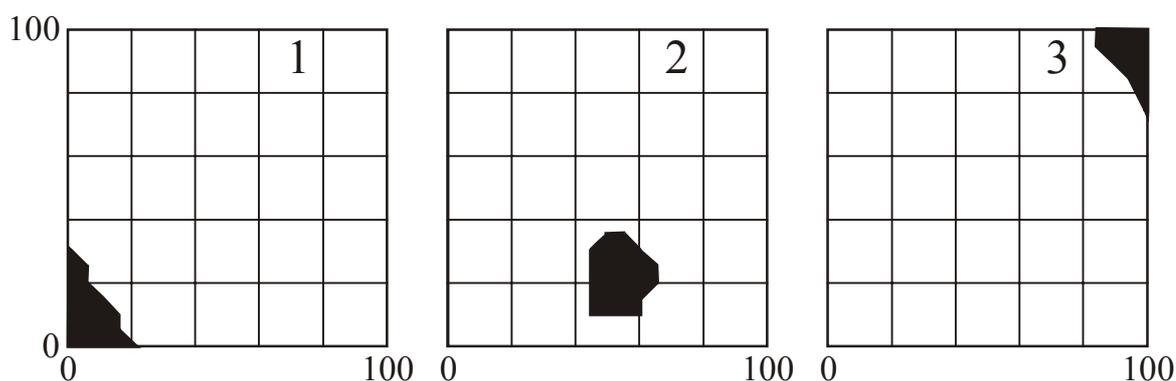


Рис. 5.11. Пример непропорционального распрямления складки для до- (1), син- (2) и послескладчатой (3) намагниченностей для смоделированных данных

По осям диаграмм представлены степени деформации каждого крыла складки (в %) по отношению к современным углам падения. Закрашены - области возможных значений степени завершенности складчатых деформаций для двух крыльях складки

Таблица 5.7. Средние направления намагниченности для модельных примеров

Намагниченность	Модельные значения		Выборочные значения		F_{\min}		κ_{\max}	
	D	I	D	I	D	I	D	I
доскладчатая	10	60	7	48	2	51	3	51
синскладчатая	150	60	121	42	149	56	148	58
послескладчатая	90	60	83	48	86	57	86	58

Примечание. В колонках представлены средние направления намагниченности, задаваемые при моделировании (колонка «Модельные значения»), вычисленные по смоделированным выборкам (колонка «Выборочные значения») и точечные оценки направления намагниченности для экстремальных значений статистических параметров F_{\min} и κ_{\max}

Экстремум ищется с помощью метода многомерной минимизации Хука–Дживса [Hooke, Jeves, 1961] с применением случайного поиска для проверки единственности экстремума [Press et al., 1986]. Определив, таким образом, систему координат, соответствующую времени образования намагниченности, вычисляется среднее направление, которое может рассматриваться как точечная оценка направления синскладчатой намагниченности. Совокупность систем координат, где значение F -критерия меньше критического значения, т.е. область, где тест складки положителен, можно рассматривать как некоторую интервальную оценку результирующего направления. Кроме того, для каждого элемента структуры определяется степень деформации (в процентах к современным углам падения пластов), на которой была приобретена намагниченность.

На рис. 5.11 представлены области возможных решений для модельных коллекций с до-, син- и послескладчатой намагниченностью (см. табл. 5.7), удовлетворяющие нулевой гипотезе: средние направления для двух крыльев складки различаются незначимо [McFadden, Jones, 1981]. Поиск производился изменением степени складчатой деформации пластов f от 0 до 100 % с шагом 5 %.

В первом и последнем случае область возможных решений содержит точки, степень складчатой деформации которых составляет 0 и 100 %, соответственно. Это может интерпретироваться как наличие до- и послескладчатой намагниченности, соответственно, что и задавалось при моделировании. Во втором случае область возможных значений f для крыльев складки в «момент» образования синскладчатой намагниченности включает задаваемые при моделировании значения (60 и 30 %). Соответствующие направления намагниченности также достаточно хорошо согласуются с моделируемыми параметрами распределений (табл. 5.7).

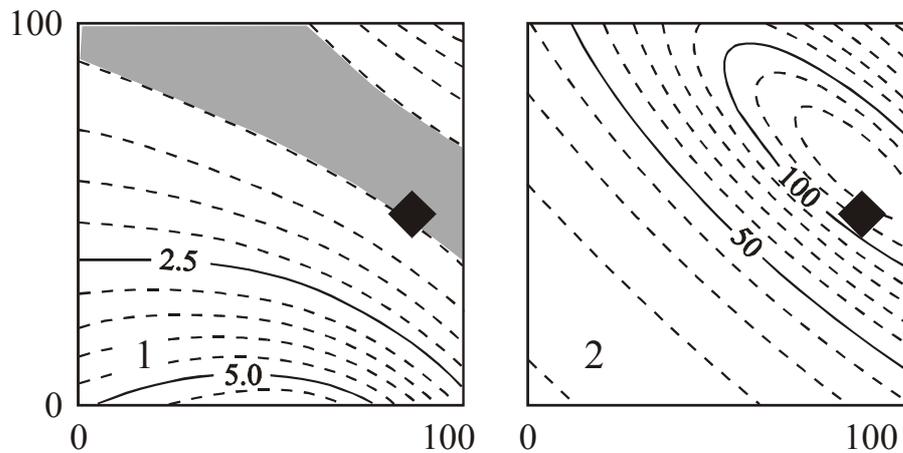


Рис. 5.12. Пример непропорционального распрямления складки для реальных данных

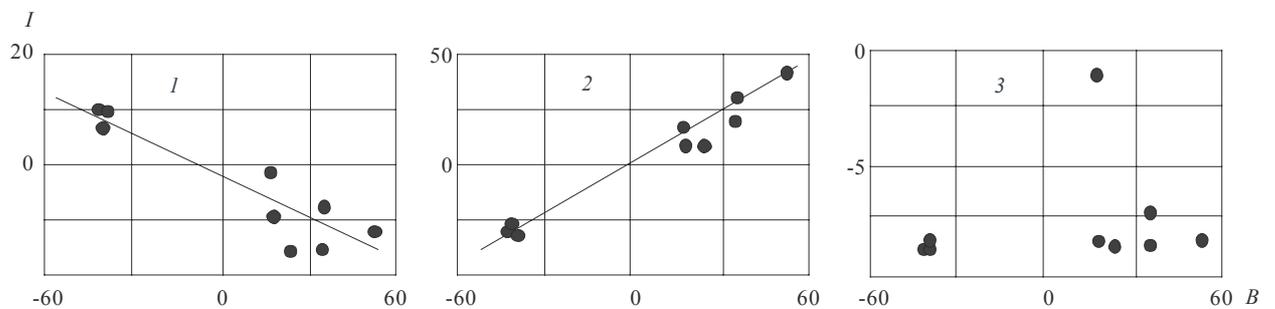


Рис. 5.13. Зависимость наклона намагниченности (I) в стратиграфической (1), географической (2) и синскладчатой (3) системах координат от углов падения пластов (B)

На модельных коллекциях получены результаты, не противоречащие вложенным в модель данным, т.е. продемонстрирована работоспособность предлагаемого метода. В качестве реального примера применения непропорционального распрямления складки выбраны данные из [Miller, Kent, 1986], во-первых, уже использованные при анализе синскладчатой намагниченности с помощью пересечения малых кругов [Шипунов, 1995б], во-вторых, дающие не совсем согласующиеся результаты, которые позволяют оценить возникающие при интерпретации реальных данных трудности.

Табл. 5.5 содержит направления векторов намагниченности в стратиграфической и географической системах координат, азимуты и углы падения пластов, а также значения степени деформации пластов, полученные с помощью пересечения малых кругов. Анализируемая структура представляет собой два крыла складки. Азимуты падения пластов и

склонения векторов намагниченности приблизительно совпадают, поэтому малые круги, образуемые векторами намагниченности при распрямлении складки, приблизительно параллельны и изменению подвергаются в основном только наклоны векторов намагниченности.

На [рис. 5.13](#) представлены зависимости наклоны намагниченности от углов падения пластов для намагниченности в стратиграфической и географической системах координат, а также для распределения синскладчатой намагниченности, выделенной с помощью пересечения малых кругов. Наличие значимой корреляции только в стратиграфической и географической координатных системах позволяет говорить о синскладчатости намагниченности.

Эти причины обуславливают широкий спектр значений F , при которых удовлетворяется нулевая гипотеза: средние векторы намагниченности статистически совпадают ([рис. 5.12](#)).

Полученная область значений F включает средние для крыльев складки величины этого параметра (ромбы на [рис. 5.12](#)), оцененного с помощью пересечения малых кругов [[Шипунов, 1995б](#)].

В следующем разделе будет показано, что, в отличие от пропорционального распрямления складки, предложенный метод, также как и метод пересечения малых кругов, дает несмещенную точечную оценку направления синскладчатой намагниченности и некоторую доверительную область для него, для которой тест складки положителен.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАПРАВЛЕНИЯ СИНСКЛАДЧАТОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Различные процедуры оценки направления синскладчатой намагниченности были проверены на численных моделях [[Левашова и др., 1999](#)]. Так как невозможно рассмотреть все возможные случаи взаимного соотношения направления синскладчатой намагниченности и различных форм складчатых структур, то были промоделированы наиболее распространенные структуры, такие как линейные складки, брахиформные структуры, моноклинали, осложненные горизонтальными и вертикальными флексурами.

Таблица 5.8. Параметры моделей

Модель (стадия)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
M1	30/70	40/60	50/65	60/60	200/40	215/35	225/30	190/45
M2	10/40	30/60	50/45	70/50	90/40	110/35	130/30	150/25
M3	80/40	95/50	110/45	90/56	95/55	110/60	90/65	85/60
(A)	50	50	50	50	50	50	50	50
(B)	40	50	40	50	60	50	60	50
(C)	30	40	30	40	60	70	60	70
(D)	20	30	20	30	70	80	70	80
(E)	10	20	10	20	80	90	80	90
(F)	0	0	0	0	100	100	100	100

Примечание. Совокупности структурных и палеомагнитных параметров каждой модели описаны в тексте. (A – F) – одинаковые для всех моделей стадии деформации, на которых произошло перемагничивание пород (в % от полного угла падения пород в каждом разрезе). S1 – S8 – элементы залегания пород (азимут/угол падения) в градусах

При моделировании различных структур менялось задаваемое истинное направление синскладчатой намагниченности. Для каждой модели с заданной геологической структурой и направлением перемагничивающего поля задавались различные стадии деформации, на которых произошло перемагничивание (табл. 5.8). При этом степень деформации

менялась таким образом, чтобы охарактеризовать различия процессов складкообразования (при пропорциональном складкообразовании степень деформации, например, двух крыльев линейной складки в момент образования намагничённости задавалась одинаковой; при непропорциональности процесса складкообразования степень деформации могла быть, например, 0 и 100 %, т.е. в одном крыле деформация еще не началась, тогда как в другом – завершилась).

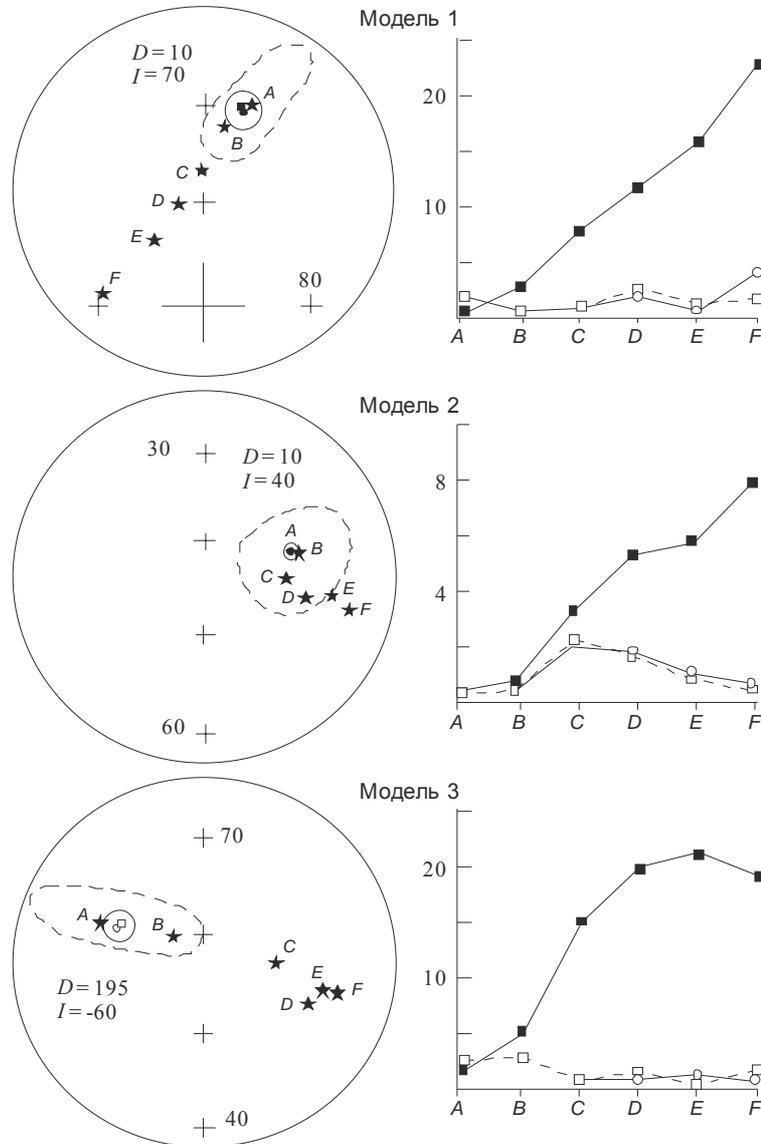


Рис. 5.13. Сравнение методов оценки направления синскладчатой намагничённости на численных моделях

На стереограммах квадратами обозначено задаваемое истинное направление поля, рядом показано его склонение и наклонение. Направление перемагничивания, полученное при помощи непропорционального распрямления складки, обозначены кружками с овалами доверия, а полученные при помощи пропорционального распрямления складки – звездочками. *A – F* соответствуют различным сочетаниям степени деформации частей структуры на момент перемагничивания (см. текст и табл. 5.8). На стереограммах показана только часть полусферы, размеченная через 10 градусов. Залитые (незалитые) символы обозначают проекции на верхнюю (нижнюю) полусферы. Графики угловой разницы между истинным направлением поля и направлением, полученным при помощи метода ступенчатого пропорционального распрямления складки (залитые квадраты), метода пересечения малых кругов (незалитые квадраты) и метода непропорционального распрямления складки (кружочки) для различных сочетаний степени деформации частей структуры на момент перемагничивания

Для каждой модели определялось направление синскладчатой намагниченности при помощи трех методов: ступенчатого пропорционального распрямления складки, пересечения малых кругов и непропорционального распрямления складки. Для оценки устойчивости получаемого результирующего направления моделирование повторялось несколько раз при каждом наборе входных параметров.

Для каждой модели задавалось: число сайтов (элементов складчатой структуры с приблизительно одинаковым залеганием) N , число образцов в каждом сайте n . Задавался некоторый незначительный разброс залеганий пластов для каждого сайта, с кучностью нормалей к пластам равной 200. Совокупность векторов синскладчатой намагниченности извлекалась из распределения Фишера $\Phi(D, I, \kappa)$ [Fisher, 1953], где D, I – склонение и наклонение среднего направления синскладчатой намагниченности, а κ – кучность распределения.

Количество проанализированных моделей слишком велико, чтобы все их можно было описать. Поэтому представлены только три наиболее характерные модели (рис. 5.13). Во всех моделях число сайтов $N = 8$, число образцов в каждом сайте $n = 10$.

Модель 1. Линейная складка. Задаваемое истинное направление перемагничивающего поля: $D = 10$; $I = 70$; $\kappa = 30$ (рис. 5.13, модель 1).

Модель 2. Половина купола. $D = 10$; $I = 40$; $\kappa = 30$ (рис. 5.13, модель 2).

Модель 3. Моноклиналь с небольшими флексурами. $D = 195$; $I = -60$; $\kappa = 30$ (рис. 5.13, модель 3).

Численное моделирование показало, что чем менее пропорциональным был процесс деформации, т.е. чем больше были различия в степени деформации разных частей структуры в момент перемагничивания, тем более смещенную оценку направления намагниченности дает традиционный метод ступенчатого пропорционального распрямления складки. В некоторых случаях угловая разница между истинным направлением поля, и направлением, найденным при помощи ступенчатого пропорционального распрямления складки, составляла 20° – 25° дуги большого круга (рис. 5.13). Напротив, и метод пересечения малых кругов, и метод непропорционального распрямления складки дают несмещенные оценки направления поля.

Простым способом оценки точности полученного результата является определение среднего направления и радиуса круга доверия α_{95} для проекций результирующего направления синскладчатой намагниченности на каждый малый круг. Полученная таким образом оценка доверительного круга занижена [Shipunov, 1997], которую можно исправить, используя результаты проделанного численного моделирования (истинное значение радиуса круга доверия в среднем в 1.5 раза больше).

ЛИТЕРАТУРА

В главе использованы следующие работы автора:

- Алексютин М.В., Шипунов С.В. (1997) Синскладчатая намагниченность пород куюльской системы покровов, Пенжинский район, Северо-Восток России // Физика Земли. 1997. № 4. С. 27–33.
- Баженов М.Л., Шипунов С.В. (1988) Метод складки в палеомагнетизме // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 7. С. 89–101.
- 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.
- Баженов М.Л., Шипунов С.В. (1991) Рассеяние палеомагнитных данных // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 5. С. 59–70.

- Буртман В.С., Гурарий Г.З., Дворова А.В., Кузнецов Н.Б., Шипунов С.В. (2000) Уральский палеоокеан в девонское время (по палеомагнитным данным) // Геотектоника. 2000. № 5. С. 61–70.
- Левашова Н.М., Шипунов С.В., Баженов М.Л. (1997) Несмещенная оценка направления синскладчатой намагниченности: новый метод, численное моделирование и экспериментальные данные // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород / Ред. В.П.Щербаков, А.Н.Диденко. М.: ОИФЗ РАН. 1997. С. 57–58.
- Левашова Н.М., Шипунов С.В., Баженов М.Л. (1999) Несмещенная оценка направления синскладчатой намагниченности: новый метод, численное моделирование и экспериментальные данные // Теоретические и региональные проблемы геодинамики. М.: Наука. 1999. С. 210–221. (Труды ГИН РАН. Вып. 515)
- Шипунов С.В. (1988) Выделение компонент многокомпонентной естественной остаточной намагниченности при палеомагнитных исследованиях // Палеомагнетизм и аккреционная тектоника / Ред. А.Н.Храмов. Л.: ВНИГРИ. 1988. С. 173–185.
- Шипунов С.В. (1991) О палеомагнетизме катавской свиты Южного Урала // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 3. С. 97–109.
- Шипунов С.В., Чумаков Н.М. (1991) Палеомагнетизм верхнепротерозойских отложений Кольского полуострова // Геотектоника. 1991. № 5. С. 38–50.
- 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. (1995а) Новый тест складки в палеомагнетизме (реабилитация теста выравнивания) // Физика Земли. 1995а. №4. С.67–74.
- Шипунов С.В. (1995б) Синскладчатая намагниченность: Оценка направления и геологическое приложение // Физика Земли. 1995б. № 11. С. 40–47.
- Шипунов С.В. (1998) История складчатости Южного Урала по палеомагнитным данным // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород / Ред. В.П.Щербаков. М.: ОИФЗ РАН. 1998. С. 69–71.
- Шипунов С.В. (1999а) Критерии значимости в палеомагнетизме // Физика Земли. 1999. № 6. С. 89–92.
- 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)
- Шипунов С.В., Бретштейн Ю.С. (1999) Проблемы компонентного анализа в палеомагнетизме // Физика Земли. 1999. № 3. С. 52–61.
- Шипунов С.В., Лекомцев А.В., Сотников С.С. (2002) Тест конгломератов в палеомагнетизме: Анализ кластеризации // Физика Земли. 2002. № 5. С. 65–70.
- Bazhenov M.L., Shipunov S.V. (1991) Fold test in paleomagnetism: new approaches and reappraisal of data // Earth and Planetary Science Letters. 1991. V. 104. P. 16–24.
- Shipunov S.V. (1997) Synfolding magnetization: Detection, testing and geological applications // Geophys. J. Int. 1997. Vol. 130. P. 405–410.

Использованная литература:

- Афифи А., Эйзен С. (1982) Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. М.: Мир, 1982. 488 с.
- Выгодский М.Я. (1973) Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1973. 872 с.
- Негруца В.З. (1971) Стратиграфия гиперборейских отложений полуостровов Среднего и Рыбачьего и о-ва Кильдин. Л.: ВСЕГЕИ. 1971. Т. 175. С. 153–186.
- Николя А. (1992) Основы деформации горных пород. М.: Мир, 1992. 168 с.

- Поллард Дж. (1982) Справочник по вычислительным методам статистики. М.: Финансы и статистика. 1982. 346 с.
- Пучков В.Н. (2000) Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Даурия, 2000. 146 с.
- Теннант-Смит Дж. (1988) Бэйсик для статистиков. М.: Мир, 1988. 208 с.
- Уилкинсон Дж., Райнш К. (1976) Справочник алгоритмов на языке Алгол. Линейная алгебра. М.: Машиностроение. 1976. 389 с.
- Храмов А.Н. (1958) Палеомагнитная корреляция осадочных толщ Л.: ВНИГРИ. 1958. Вып. 116. 219 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.
- 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. (1993) The drift of the Fennoscandian and Ukrainian shields during the Precambrian: a palaeomagnetic analysis // *Tectonophysics*. 1993. Vol. 23. P. 177-198.
- Elmore D.R., Foucher J.L.-E., Evans M., Lewchuk M., Cox E. (2006) Remagnetization of the Tonoloway Formation and the Helderberg Group in the Central Appalachians: testing the origin of syntilting Magnetizations // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 166. P. 1062–1076.
- Enkin R.J. (1994) A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Sidney: Pacific Geoscience Centre, Geol. Survey Canada. 1994. 16 p.
- Fisher R.A. (1953) Dispersion on a sphere // *Proc. R. Soc. London*. 1953. A 217. P. 295-305.
- 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.
- Henry B., Rouvier H, Le Goff M. (2004) Using syntectonic remagnetizations for fold geometry and vertical axis rotation: the example of the Cévennes border (France) // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 157. P. 1061–1070.
- Hooke, Jeves (1961)
- Kent J.T., Briden J.C., Mardia K.V. (1983) Linear and planar structure in ordered multivariate data as applied to progressive demagnetization of palaeomagnetic remanence // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1983. Vol. 75. P. 593-621.
- Kent D.V., Uppuke N.D. (1985) Multicomponent magnetization from the Mississippian Mauch Chunk formation of the Central Appalachians and their tectonic implications // *J. Geophys. Res.* 1985. Vol. 90. P. 5371-5383.
- 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.
- Kirschvink J.L. (1985) A method for finding a paleomagnetic pole position from sediments remagnetized during folding // *JAGA/JAMAP. Abstracts*. Prague. 1985. P. 177.
- Kjode J. (1980) Palaeomagnetism of late Precambrian dolerite dykes from Varanger peninsula, North Norway // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1980. Vol. 21. № 1. P. 39-49.
- Kjode J., Storedvedt K.M., Roberts D., Gildskehaug A. (1978) Palaeomagnetic evidence for large-scale dextral movement along the Trollfjord-Komagelv Fault, Finnmark, north Norway // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1978. Vol. 16. P. 132-144.
- McCabe C., Elmore R.D. (1989) The occurrence and origin of Late Paleozoic remagnetization in the sedimentary rocks of North America // *Rev. Geophys.* 1989. Vol. 27. № 4. p. 471-494.
- McClelland-Brown E. (1983) Palaeomagnetic studies of fold development and propagation in the Pembrokeshire old red sandstone / *Tectonophysics*. 1983. V. 98. P. 131–149.
- McFadden P.L. (1980) The best estimate of Fisher's precision parameter // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1980. Vol. 60. P. 397-407.
- McFadden P.L. (1990) A new test for palaeomagnetic studies // *Geophys. J. Int.* 1990. Vol. 103. P. 163-169.
- McFadden P.L., Jones D.L. (1981) The fold test in palaeomagnetism // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1981. V. 67. P. 53–58.
- McFadden P.L., McElhinny M.W. (1988) The combined analysis of remagnetization circles and direct observations in palaeomagnetism // *Earth Planet/ Sci. Lett.* 1988. Vol. 87. P. 161-172.

- McFadden P.L., Schmidt P.W. (1986) The accumulation of palaeomagnetic results from multicomponent analysis // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1986. Vol. 86. P. 965-979.
- Miller J.D., Kent D.V. (1986a) Synfolding and pre-folding magnetizations in the Upper Devonian Catskill Formation of Eastern Pennsylvania: implications for the tectonic history of Acadia // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. P. 12791-12803.
- Miller J.D., Kent D.V. (1986b) Paleomagnetism of the Upper Devonian Catskill formation from the southern limb of the Pennsylvania salient: Possible evidence for oroclinal rotation // *Geophys. Res. Lett.* 1986. Vol. 13. P. 1173-1176.
- Miller J.D., Kent D.V. (1988) Paleomagnetism of the Siluro-Devonian Andreas Redbeds: Evidence for an Early Devonian supercontinent? // *Geology* 1988. Vol. 16. P. 195-195.
- Niitsuma S., Niitsuma N., Saito K. (2003) Evolution of the Komiji Syncline in the North Fossa Magna, central Japan: Paleomagnetic and K–Ar age insights // *The Island Arc*. 2003. V. 157. P. 1061–1070.
- Pearson K. (1991) On lines and planes of closest fit to systems of points in space // *Philos. Mag. Ser.* 6. 1901. Vol. 2. P. 559-572.
- Press et al. (1986)
- Schmidt P.W. (1982) Linearity spectrum of multi-component magnetizations and its application to some igneous rocks from south-eastern Australia // *Geophys. J. R. astr. Soc.* 1982. Vol. 70. P. 647-666.
- Schmidt P.W. (1985) Bias in converging great circle methods // *Earth and Planetary Science Letters*. 1985. Vol. 72. P. 427-432.
- Surmont J., Sandulescu M., Bordea S. (1990) Mise en évidence d'une réaimantation fini crétacée des séries mésozoïques de l'unité de Bihor (Monts Apuseni, Roumanie) et de sa rotation horaire ultérieure // *C. R. Acad. Sci. Paris*. 1990. T. 310. Série II. P. 213–219.
- Tauxe L., Watson G.S. (1994) The fold test: an eigen analysis approach // *Earth and Planetary Science Letters*. 1994. Vol. 122. P. 331-341.
- Torsvik T.H., Smethurst M.A., Van der Voo R., Trench A., Abrahamsen N., Halvorsen E. (1992) Baltica. A synopsis of Vendian-Permian palaeomagnetic data and their palaeotectonic implications // *Earth-Science Reviews*. 1992. Vol. 33. P. 133-152.
- Torsvik T.V. (1987) Interactive analysis of palaeomagnetic data. User guide. Bergen. 1987. 74 p.
- Waldhör M., Appel E (2006) Intersections of remanence small circles: new tools to improve data processing and interpretation in palaeomagnetism // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 166. P. 33–45.
- Watson G.S. (1956) Analysis of dispersion on a sphere // *Monthly Notices R. astr. Soc., Geophys. Suppl.* 1956. Vol. 7. P. 153-159.
- Watson G.S., Enkin R.J. (1993) The fold test in paleomagnetism as a parameter estimation problem // *Geophys. Res. Lett.* 1993. Vol. 20. P. 2135-2137.
- Zijderveld J.D.A. (1967) A.c. demagnetization of rocks: analysis of results // *Methods in palaeomagnetism* / Ed. D.W. Collinson, K.M. Creer, S.K. Runcorn. Amsterdam, a.o. Elsevier Publ. Co. 1967. P. 254-286.