

## Глава 9. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ МИГРАЦИИ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ

Введение .....	1
Критерии палеомагнитной надежности .....	1
Способы построения кривых миграции палеомагнитных полюсов .....	5
Новый подход к построению кривых миграции палеомагнитных полюсов .....	7
Реализация и результаты .....	8
Выводы .....	9
Литература .....	9

### ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия все большее значение в геологии приобретают палеомагнитные данные, являющиеся подчас единственным инструментом, позволяющим *количественно* интерпретировать взаимные перемещения и вращения различных блоков земной коры. Палеомагнитные данные образуют жесткий каркас, в который должны укладываться все модели дрейфа литосферных плит, процессов их консолидации и событий на их окраинах, являясь при этом основой для палеогеодинамических реконструкций. Таким образом, надежность палеомагнитных данных определяет надежность палеогеодинамических реконструкций.

### КРИТЕРИИ ПАЛЕОМАГНИТНОЙ НАДЕЖНОСТИ

Используемые для построения кривых миграции палеомагнитных полюсов палеомагнитные определения представляют собой датированные направления палеомагнитного поля с угловыми характеристиками их точности. Одним из первых, обычно проводимых шагов при построении кривых палеомагнитных полюсов является селекция имеющихся палеомагнитных определений по тем или иным параметрам (критериям, условиям), характеризующим их надежность и достоверность. В настоящее время самыми употребляемыми являются следующие:

1. DEMAGCODE из мировой палеомагнитной базы данных [Pisarevsky, McElhinny, 2003];
2. Критерии достоверности (надежности) [Van der Voo, 1990];
3. Индекс палеомагнитной надежности (ИПН) [Печерский, Диденко, 1995].

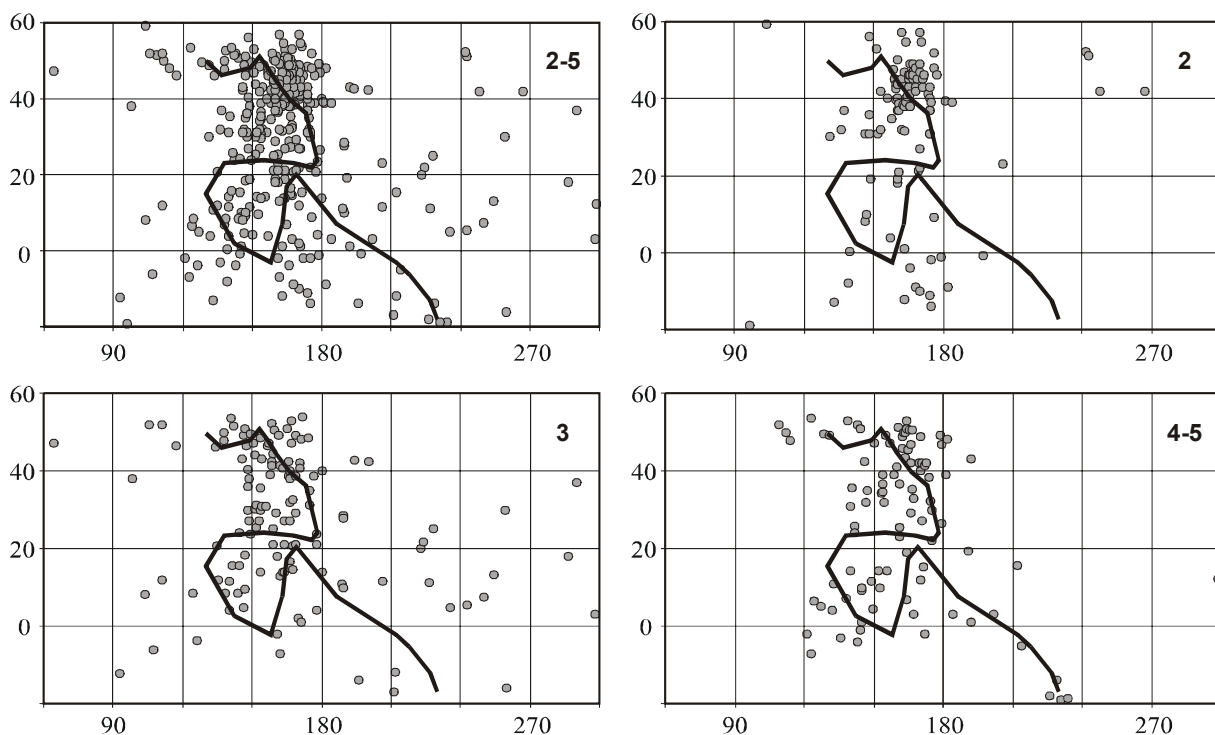
Охарактеризуем каждый из них, акцентируя внимание на возможность повышения надежности совокупности палеомагнитных данных, прошедших фильтр (условия) отбора, по сравнению с исходной выборкой.

DEMAGCODE (далее DC) – число от 0 до 5, описывающее использованную процедуру магнитной чистки: DC = 0 – отсутствие магнитной чистки; DC = 1 – «временная» чистка (выдержка палеомагнитных образцов в земном поле, в положении развернутом на 180 градусов относительно *in situ*); DC = 2 – чистка температурой или переменным полем до «заданных значений»; DC = 3 – выбор режима магнитной чистки (температурной или переменным полем) по результатам детального размагничивания пилотной коллекции (~10% от общего объема коллекции); DC = 4 – детальная магнитная чистка всей коллекции температурой или переменным полем; DC = 5 – детальная магнитная чистка всей коллекции с применением разных способов размагничивающего воздействия.

На рис. 1 приведены исходные палеомагнитные определения из мировой палеомагнитной базы данных для палеозоя Восточно-Европейской платформы [Pisarevsky, McEl-

hinny, 2003] для разных значений DC. Можно заметить, что определения с разной интенсивностью размагничивающих воздействий занимают практически одну и ту же область в пространстве палеомагнитных полюсов, т.е. нельзя сказать, что палеомагнитные определения с DC=4–5 предпочтительнее определений с малой величиной DC (например, 2).

Р. Ван дер Ву [Van der Voo, 1990] вводит 7 условий (критериев) надежности, которым приписывается *одинаковая значимость*. В зависимости от того, выполняется или нет каждое из условий, палеомагнитному определению назначается фактор качества, который может принимать числовые значения от 0 (ни одно из условий не выполняется – «плохие», ненадежные палеомагнитные данные) до 7 (удовлетворяются все условия – очень «хорошие», надежные палеомагнитные данные). Кратко перечислим эти условия (сделанные при анализе этих условий замечания применимы также и для ИПН [Печерский, Диденко, 1995]).



**Рис. 1.** Зависимость результата селекции палеомагнитных полюсов от интенсивности магнитной чистки (DEMACODE). Исходные полюса из мировой палеомагнитной базы данных [Pisarevsky, McElhinny, 2003], кривая их миграции из [Smethurst et al., 1998]. Цифрами обозначены величины DEMACODE

1. Хорошо определен возраст изучаемых пород и есть уверенность в том, что намагниченность имеет тот же возраст;
2. Достаточное количество образцов (более 24), величина кучности (более 10) и «точность» определения среднего палеомагнитные направления (радиус круга доверия менее 16 градусов);
3. Достаточно качественная магнитная чистка, результаты которой продемонстрированы;
4. Применены полевые тесты, которые позволили определить возраст намагниченности;

5. Имеется структурный контроль и показана тектоническая связь с кратоном;
6. Наличие намагниченности двух полярностей;
7. Отсутствие сходства с палеомагнитными полюсами более молодых горных пород.

Первое условие, в полном его виде, может полностью определить надежность, однако, какова оценка, хотя бы качественная, уверенности в том, что время образования намагниченности соответствует времени образования горной породы? Такая уверенность как раз и может быть получена только при рассмотрении остальных 6-и условий. Так что, можно, вероятно, редуцировать первое условие надежности к «*Хорошо определен возраст изучаемых пород*», что без сомнения является одним из необходимых условий применения палеомагнитного метода.

Второе условие сводится к «хорошему» определению точности среднего вектора. Основной из перечисленных (объем выборки, кучность векторов, точность определения вектора) характеристикой палеомагнитных результатов является кучность векторов. Отметим, что эти три величины находятся во взаимно однозначном соответствии (любые две однозначно определяют третью). Однако, для предложенных здесь значений (кучность 10, количество векторов 24) величина радиуса круга доверия должна быть 9, т.е. реальное качество данных значительно ниже. Как показано в [Баженов, Шипунов, 1991] кучность менее 10, действительно может служить порогом надежности. Более того, учитывая также размер исходной выборки можно оценить кучность распределения средних направлений и палеомагнитных полюсов.

Условие 3. Конечно, только полная процедура *качественной* магнитной чистки позволяет утверждать, что все возможное для получения информации, содержащейся в палеомагнитной коллекции, сделано. Однако, как показывает опыт палеомагнитных исследований, например, при однокомпонентности исходной намагниченности, иногда достаточно и небольших температур «чисток». Кроме того, нередки случаи, когда при переобработке палеомагнитных коллекций прежних лет, получают те же самые результаты (конечно же, только после нового полного палеомагнитного анализа появляется дополнительное обоснование для результатов прошлых лет). Таким образом, это условие (также как и DEMAGCODE), не являясь обязательным, характеризует, однако, усилия палеомагнитолога для получения, обоснования и *опровержения* палеомагнитного определения. Это же относится и к следующему условию.

Условие 4. Палеомагнитные полевые тесты дают возможность оценить время образования намагниченности по отношению к времени некоторых геологических событий. Значимость их определяется надежностью оценки и величиной временного интервала между образованием пород и временем геологического события (например, временем складкообразования).

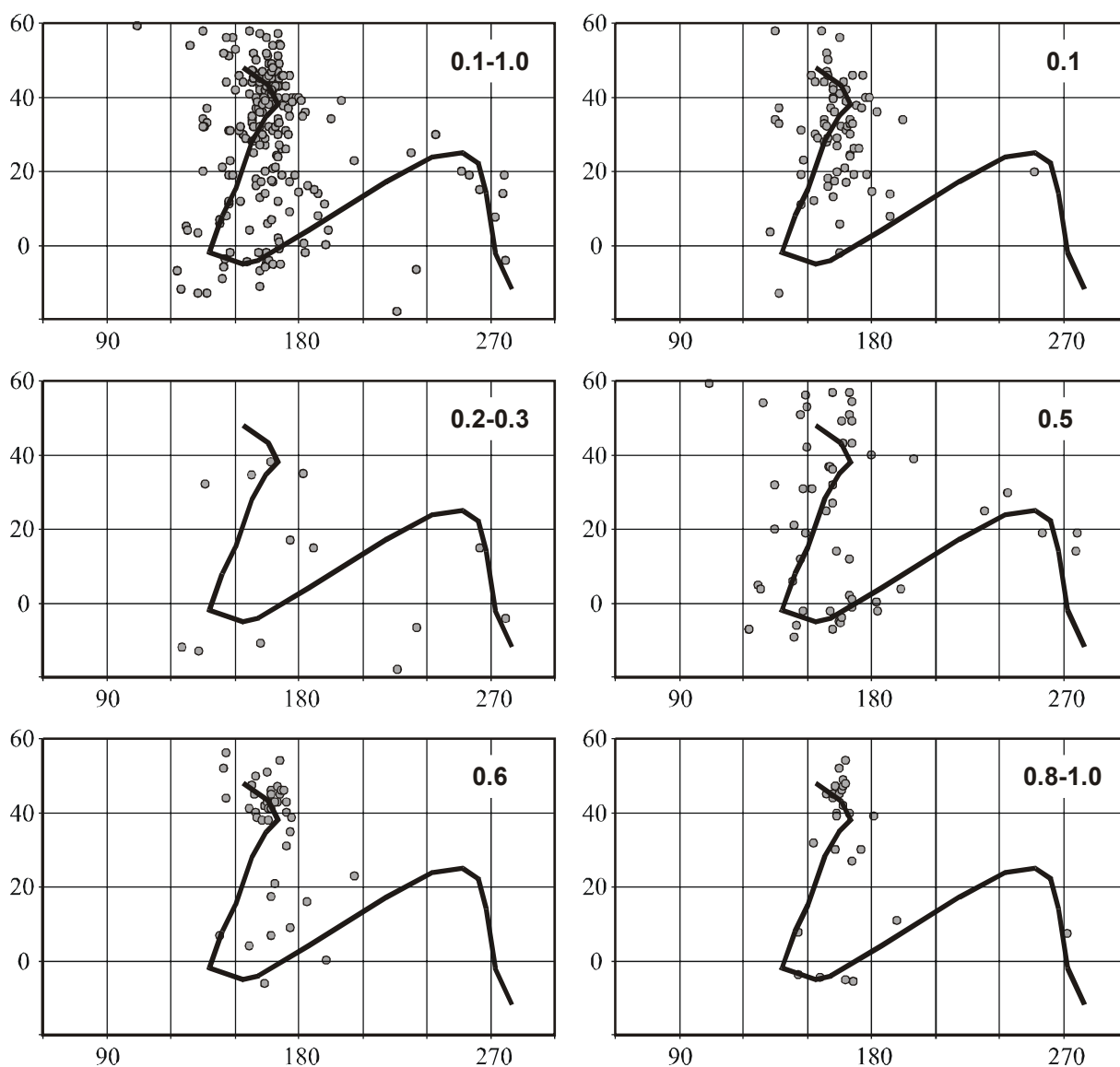
Условие 5. Только палеомагнитные определения для геологического разреза, принадлежащего некоторому блоку земной коры, может характеризовать сам блок (частный случай – платформу).

Условие 6. Наличие двух полярностей, тем более без применения теста обращения, не может служить обоснованием надежности палеомагнитного определения. Присутствие вторичной компоненты, даже не изменив полярности, может сильно исказить искомое направление. Кроме того, известны случаи [Larson, Walker, 1975; Шипунов, 1991], когда даже положительный результат теста обращения, не позволял отнести намагниченность к первичной.

Условие 7. Такая похожесть может возникнуть, например, при гипотетической траектории движения палеомагнитных полюсов с петлями. Т.е. «похожесть» может индуци-

ровать сомнение, не являются ли полученные данные результатом более позднего перемагничивания (частичного или полного).

При рассмотрении этого списка важно отметить, что «значимость» перечисленных условий в обосновании надежности палеомагнитных определений явно различна. Это отмечает Д.М.Печерский [Печерский, 2006]: «...проблема связана с формальным использованием менее значимых критериев (например, предельный уровень числа образцов,  $\alpha_{95}$ , публикации) в равном весе с такими высоко значимыми критериями, как тест складки, соответствие компонент  $J_n$  определенному возрасту и т.п. В результате возникает ситуация, когда за счет второстепенных признаков определению присваивается достаточно высокий индекс надежности, даже если высоко значимые признаки отсутствуют или дают отрицательный результат».



**Рис. 2.** Зависимость результата селекции палеомагнитных полюсов от индекса палеомагнитной надежности (ИПН). Исходные полюса и кривая их миграции из [Печерский, Диденко, 1995]. Цифрами обозначены величины ИПН

Поэтому более правильным кажется подход, предложенный в книге [Печерский, Диденко, 1995], где используется «количественный критерий надежности палеомагнитных определений, суммирующий по возможности всю информацию о конкретном определении» (индекс палеомагнитной надежности ИПН); при этом «каждая последующая оценка суммирует предыдущие» [Печерский, 2006]..

1. вес 0 – определение с указаниями на перемагничивание, время которого неизвестно;
2. вес 0,1 – отсутствуют данные о применении тестов, указывающих на соответствие возраста стабильной компоненты  $J_n$  возрасту пород (в первую очередь, тесты обжига, длинных частиц, складки, галек, обращения);
3. вес 0,3 – точность определения возраста пород хуже 20 млн. лет;
4. вес 0,5 – количество независимо ориентированных образцов  $N < 25$ , кучность  $K < 10$  и угол доверия  $\alpha_{95} > 15$ ;
5. вес 0,6 – отсутствует компонентный анализ;
6. вес 0,8 – отсутствует Т-чистка;
7. вес 1,0 (высший) – в суммарное палеомагнитное направление входят первичные или близкие им по возрасту компоненты различного генезиса (термическая и ориентационная), если полученное палеомагнитное направление статистически совпадает с направлением первичных или близких им компонент  $J_n$ , строго определено время их приобретения.

На рис. 2 приведены исходные данные (всего более 200 палеомагнитных определений) для палеозоя Восточно-Европейской платформы из книги [Печерский, Диденко, 1995] при различных значениях ИПН. В этой книге при построении кривой миграции палеомагнитных полюсов использовалось осреднение исходных данных с весом, соответствующим их ИПН. Выводы аналогичны выводам, сделанным при рассмотрении рис. 1: определения с разным значением индекса палеомагнитной надежности занимают практически одну и ту же область в пространстве палеомагнитных полюсов. Тот же вывод может быть сделан и для критерия достоверности [Van der Voo, 1990], используя данные из [Van der Voo, 1993].

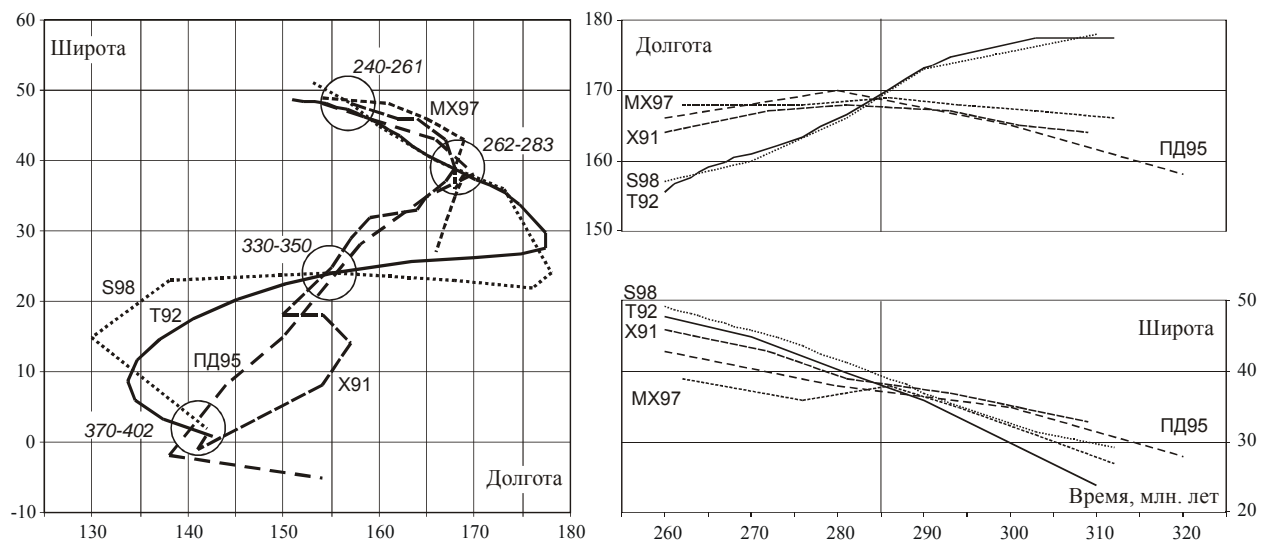
Основной вывод из этого раздела: палеомагнитные определения с самой высокой и с самой низкой надежностью *могут* располагаться в одной и той же области пространства полюсов. И, следовательно, можно сделать парадоксальное заключение: нельзя *a priori* заключить, что «высоко надежное» палеомагнитное определение – более валидно, чем «низко надежное» (и, наоборот, что «низко надежное» определение – менее валидно, чем «высоко надежное»).

### **СПОСОБЫ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ МИГРАЦИИ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ**

В практике палеомагнитных исследований имеются два основных пути построения кривых миграции палеомагнитных полюсов [Печерский, Диденко, 1995]: разнообразные виды сглаживания и подбор аппроксимирующей зависимости (это близкие способы, так как и то и другое приводит к сглаживанию исходных данных). Результат построения – набор точек в пространстве палеомагнитных полюсов, для которых, как правило, для точечного времени даны координаты палеомагнитных полюсов и их угловая точность (при аппроксимации сплайнами, например, [Torsvik et al., 1992; Smethurst et al., 1998] точность не указывается). Иногда (например, [Van der Voo, 1993]), вместо точечных оценок времени использованы геологические, например, такие как пермь, ранний карбон и др. В любом случае, полагается, что координаты палеомагнитных полюсов для некоторого времени определены с представленной точностью.

На рис. 3 приведены кривые миграции палеомагнитных полюсов из пяти различных работ [Храмов, 1991; Torsvik et al., 1992; Печерский, Диденко, 1995; Молостовский, Храмов, 1997; Smethurst et al., 1998]. Отметим, что для построения кривых миграции палеомагнитных полюсов [Torsvik et al., 1992; Smethurst et al., 1998] было использовано около 40 прошедших фильтр отбора палеомагнитных определений (в основном без данных по бывшему СССР); для кривой [Молостовский, Храмов, 1997] – 85; а при построении кривой [Печерский, Диденко, 1995] – более 200 палеомагнитных определений с разными весами.

Кривые палеомагнитных полюсов (рис. 3) достаточно хорошо согласуются между собой только для позднего палеозоя (карбон – пермь). Более того, в пространстве палеомагнитных полюсов выделяются 4 компактные области, через которые проходят все рассматриваемые кривые. Однако, временная привязка, даже для хорошо согласующегося пермского интервала кривых, оставляет желать лучшего. Координаты палеомагнитных полюсов для одного геологического времени различаются сильно значимо и вытянуты вдоль общего тренда кривых. Для каждой из 4-х областей на рис. 3 (слева) приведены временные интервалы, которыми датируются наибольшие сгущения по кривым миграции палеомагнитных полюсов. На рис.3 (справа) для наиболее «молодого» пермского участка кривых представлены зависимости склонения и наклонения палеомагнитных полюсов от геологического времени. Следует, однако, отметить, что авторы этих кривых возможно использовали разные шкалы геологического времени.



**Рис. 3.** Примеры позднепалеозойских ветвей кривых миграции палеомагнитных полюсов  
 Обозначения кривых: X91 – [Храмов, 1991], T92 – [Torsvik et al., 1992], ПД95 – [Печерский, Диденко, 1995], MX97 – [Молостовский, Храмов, 1997], S98 – [Smethurst et al., 1998]. Большие круги-области пространства полюсов, где кривые миграции палеомагнитных полюсов образуют хорошие «пересечения» (цифры – размах в оценках геологического времени в млн. лет для разных кривых). Слева – зависимости долготы и широты палеомагнитных полюсов от геологического времени

Таким образом, в целом кривые миграции палеомагнитных полюсов не удовлетворяют возложенным на них палеомагнитологами надеждам – предлагаемые координаты палеомагнитных полюсов для указанного геологического времени не могут быть истинными с угловой точностью, представленной авторами. Однако, возможно, что некоторые области в пространстве полюсов – более надежны.

## НОВЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ КРИВЫХ МИГРАЦИИ ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ

Предлагаемый подход построения кривых миграции палеомагнитных полюсов основан на двух принципах: принцип пространства и принцип времени.

*Принцип пространства.* В области, где должна проходить истинная кривая палеомагнитных полюсов должно быть много полюсов (больше, чем в других областях пространства палеомагнитных полюсов) и их концентрация должна быть высока.

Если предположить, что палеомагнитные данные имеют кучность  $> 10$  и количество образцов в разрезе  $> 25$ , то средняя оценка для кучности средних палеомагнитных направлений должна быть 250 [Mardia, 1972] (минимальная кучность – 100). Соответствующий минимальной (пороговой) кучности радиус круга, в котором содержится 95 % векторов, составляет  $R = 15$  градусов ([Шипунов, 1994], табл. 2.1). Принцип пространства использует условия предшественников (ограничения на кучность векторов намагниченности и их количество) [Van der Voo, 1990; Печерский, Диденко, 1995].

Процедура, реализующая *принцип пространства*.

1. Все палеомагнитные полюса из пространства полюсов пересчитываются в пространство направлений для центра платформы.

2. В пространстве направлений в сетке с некоторым (любым, достаточно малым) шагом учитываются все направления, попадающие в круг радиуса  $R$  и обратные к ним.

3. Для них вычисляются:

среднее направление ( $D_m, I_m$ ),  
количество учтенных полюсов ( $N$ ),  
их кучность ( $K$ ).

4. Производится обратный пересчет средних направлений в пространство полюсов ( $L_p, F_p$ ).

5. Каждый полученный таким образом кластер проверяется на устойчивость [Шипунов, 1988]. При этом, начиная из центра полученного кластера, повторяются операции предыдущих пунктов до тех пор, пока центр не перестанет смещаться.

Единственный используемый при расчетах внешний параметр –  $R$ . Например, если  $R = 0$ , то в результате мы будем иметь исходную выборку (т.е. все исходные полюса). С другой стороны, если  $R$  очень большое (например, 180), то будет получен один средний полюс (фиктивный!) для всей исходной выборки. Исходя из минимальной оценки кучности средних направлений, величина  $R$  выбирается 15 градусов.

Таким образом, в результате будет получена таблица:  $N$  (количество вошедших в кластер направлений); их кучность  $K$ ;  $L_p, F_p$  и соответствующий список, вошедших в каждый вычисленный средний полюс исходных единичных полюсов с интервальной оценкой возраста пород ( $T_{min}, T_{max}$ ).

*Принцип времени.* Намагниченность не может возникнуть раньше образования пород. С другой стороны, намагниченность может быть вторичной, т.е. моложе пород.

В связи с тем, что возраст изученной части геологического разреза задан в виде интервальной оценки ( $T_{min}, T_{max}$ ), а для палеомагнитных определений, попавших в один кластер, предполагается одно время возникновения намагниченности, хоть часть которых (палеомагнитных определений) полагается первичными или близкими к таковым, то *максимальная оценка времени*, соотносимого с кластером, является минимальная оценка  $T_{max}$  различных палеомагнитных определений, составляющих кластер. Минимальную оценку времени кластера можно определить, рассматривая более «молодой» кластер.

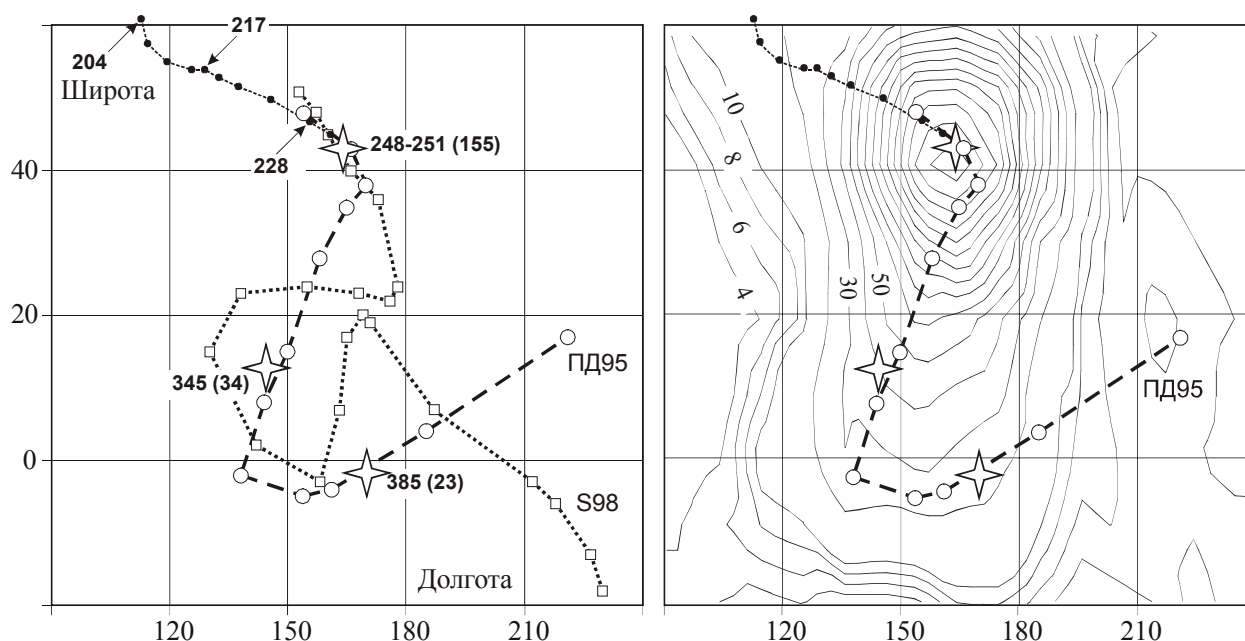


## РЕАЛИЗАЦИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для реализации предлагаемого подхода использовались палеозойские палеомагнитные определения из мировой палеомагнитной базы данных [Pisarevsky, McElhinny, 2003], относящиеся к «стабильной» Европе. Выбирались только те палеомагнитные определения, возраст пород которых включал палеозой (более 350 палеомагнитных определений).

В один кластер вошли как определения с возрастом пород, соответствующим исконому, так и определения для явно перемагнитченных пород. Предлагаемые временные оценки для кластеров определяются минимальным значением времени нижней геологической границы (минимальное значение  $T_{\max}$  для различных исходных палеомагнитных определений, вошедших в кластер).

Для всех устойчивых кластеров отсутствует корреляция между координатами палеомагнитных полюсов и координатами мест отбора, что дополнительно свидетельствует о принадлежности палеомагнитных определений в целом одной тектонической единице (в данном случае стабильной Европе). Полученные кластеры соответствуют положению палеомагнитных полюсов поздней перми, раннего карбона и среднего девона (248-251, 345 и 385 млн. лет, соответственно).



**Рис. 9.4.** Результаты применения алгоритма построения кривых миграции палеомагнитных полюсов

Звездочки – центры устойчивых кластеров с указанием оценок времени (в млн. лет) и количества вошедших в кластер исходных полюсов (в скобках). Черные точки и штриховая линия – триасовая ветвь кривой с оценками времени. Справа – густота исходных палеомагнитных определений в пространстве полюсов. Остальные обозначения см. на рис. 3

**Таблица 9.1.** Центры устойчивых кластеров

$L_p$	$F_p$	$N$	$K_p$	$\alpha_{95}$	$\min T_{\max}$
163.9	43.0	155	87	1.2	<b>248-251</b>
144.5	12.9	34	76	2.8	<b>345</b>



В результате (после учета кластеров с кучностью палеомагнитных направлений более 100 и количеством исходных палеомагнитных определений в кластере более 2) получено только 3 (!) устойчивых кластера (табл. 9.1, рис. 9.4), центры которых определяют *опорные* точки искомой кривой миграции палеомагнитных полюсов.

## ВЫВОДЫ

1. Показано, что палеомагнитные определения с самой высокой и с самой низкой «надежностью» *могут* располагаться в одной и той же области пространства полюсов. Следовательно, существующие «критерии надежности» палеомагнитных данных не отражают их валидность – не наблюдается однозначной зависимости «надежности» и близостью палеомагнитных полюсов гипотетической области, где должна проходить истинная кривая миграции полюсов, и нельзя утверждать, что «высоко надежное» палеомагнитное определение – более валидно, чем «низко надежное» (и, наоборот, что «низко надежное» определение менее валидно, чем «высоко надежное»).

2. Предложен новый способ конструирования кривой миграции палеомагнитных полюсов, основанный на простых принципах (принципы *пространства* и *времени*). Результаты его применения в первом приближении согласуются с предыдущими кривыми лишь в некоторых точках. По-видимому, в настоящее время рано говорить о кривой миграции палеомагнитных полюсов Восточно-Европейской платформы. Имеются лишь некоторые компактные и малочисленные области в пространстве полюсов, через которые, по-видимому, проходит искомая кривая.

3. Датирование полученных кластеров (с использованием сформулированного принципа времени) дает более «молодые» даты по сравнению с предыдущими работами.

## ЛИТЕРАТУРА

**Данная глава основана на следующих работах автора:**

- Баженов М.Л., Шипунов С.В. (1991) Рассеяние палеомагнитных данных // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 5. С. 59–70.
- Кузнецов Н.Б., Шипунов С.В., Павленко Т.И. (2000) Позднепалеозойская тектоническая активизация Урала // Общие и региональные вопросы геологии. Вып. 2. М.: Геос. 2000. С. 91–106.
- Шипунов С.В. (1988) Выделение компонент многокомпонентной естественной остаточной намагниченности при палеомагнитных исследованиях. Л. Труды ВНИГРИ. 1988. С. 173–188.
- Шипунов С.В. (1991) О палеомагнетизме катавской свиты Южного Урала // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. № 3. С. 97–109.
- Шипунов С.В. (1994) Элементы палеомагнитологии. М. Геологический институт РАН. 1994. 64с.
- Шипунов С.В., Черников А.П., Данукалов К.Н., Михайлов П.Н., Козлов В.И. (1999) Позднепалеозойские палеомагнитные полюса Восточно-Европейской плиты // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород / Ред. В.П.Щербаков. М.: ОИФЗ РАН. 1999. С. 61–62.
- Шипунов С.В., Шацлло А.В., Орлов С.Ю. (2007) Валидность палеомагнитных полюсов и принципы построения их кривых миграции (на примере Восточно-Европейской платформы) // Физика Земли. 2007. № 10. С. 99–99.

**Использованная литература:**

- Молостовский Э.А., Храмов А.Н. (1997) Магнитостратиграфия и ее значение в геологии. Саратов. Изд. Саратовского ун-та. 1997. 180 с.
- Печерский Д.М. (2006) Палеомагнитология, петромагнитология и геология. Словарь-справочник для соседей по специальности. М. ИФЗ. 2006. (<http://paleomag.ifz.ru/>)
- Печерский Д.М., Диденко А.Н. (1995) Палеоазиатский океан. М. ИФЗ РАН. 1995. 298 с.
- Храмов А.Н. (1991) Стандартные ряды палеомагнитных полюсов для плит Северной Евразии: связь с проблемами палеогеодинамики территории СССР. Палеомагнетизм и палеогеодинамика территории СССР. Л. ВНИГРИ. 1991. С. 154-176.
- Larson E.E., Walker T.R. (1975) Development of chemical remanent magnetization during early stages of red-bed formation in late cenozoic sediments, Baja California. // Geol. Soc. Amer. Bull. 1975. Vol. 86. N 5. P. 639-650.
- Mardia K.V. (1972) Statistics of directional data. London. Acad. Press. 1972. 357 p.
- Pisarevsky S.A., McElhinny M.E. (2003) Global Paleomagnetic visual data base developed into its visual form. EOS. 2003. Vol. 84. N 20.
- Smethurst M.A., Khramov A.N., Pisarevsky S. (1998) Palaeomagnetism of the Lower Ordovician Orthoceras Limestone, St. Petersburg, and a revised drift history for Baltica in the early Palaeozoic // Geophys. J. Int. 1998. Vol. 133. P. 44-56.
- 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.
- Van der Voo R. (1990) The reliability of paleomagnetic data // Tectonophysics. 1990. Vol. 184. P. 1-9.
- Van der Voo R. (1993) Palaeomagnetism of the Atlantic, Thetys and Iapetus oceans. Cambridge. University press. 1993. 412 p.