

УДК 551.465

ИЗМЕНЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ФАНЕРОЗОЕ

© 2017 г. А. А. Шрейдер¹, А. А. Игнатова¹, Ал. А. Шрейдер^{2,1},
А. Э. Сажнева¹, П. Ю. Пугин^{3,1}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия
e-mail: aschr@ocean.ru

² Общество с ограниченной ответственностью научно-исследовательский институт “Газэкономика”,
Москва, Россия

³ Общество с ограниченной ответственностью “Акселерейшн”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 25.08.2015 г., после доработки 28.06.2016 г.

Данные виртуального дипольного момента неравномерно распределены во времени, что в значительной мере затрудняет качественный и количественный анализ его эволюции. Наряду с методом скользящего среднего и медианных значений впервые представлена методика квазиравномерного представления данных (метод интерполяции) и впервые приводятся результаты расчета по этой методике эволюции ВДМ для фанерозоя.

DOI: 10.7868/S0030157417060107

ВВЕДЕНИЕ

Основной особенностью структуры магнитного поля в океане является существование мировой системы линейных магнитных аномалий. Вайн и Метьюз, Морли и Ларошель [19, 26] первыми связали происхождение линейных магнитных аномалий океана с процессом формирования новой океанической коры, предположив инверсионную природу намагниченности магнитоактивного слоя океана. Источники магнитных аномалий формируются на осях срединно-океанических хребтов и затем перемещаются в составе инверсионного магнитоактивного слоя жестких плит литосферы по сферической поверхности Земли. Инверсионный магнитоактивный слой, слагающий океаническое дно, представлен породами, остаточная намагниченность которых часто значительно отличается от индуцированной современным полем. Поэтому важнейший вклад в формирование амплитудной характеристики линейных магнитных аномалий, при прочих равных условиях, вносит величина напряженности древнего Земного магнитного поля, под воздействием которого на осях спрединга происходил процесс намагничивания материала новой океанической коры.

Основной характеристикой поведения земного магнитного поля во времени является распределение значений виртуального дипольного момента (ВДМ), который рассматривается как дипольный момент эквивалентного геоцентрического диполя, продуцирующего известную величину

и наклонение вектора древнего дипольного поля в определенный момент в прошлом. Величина напряженности земного магнитного диполя не оставалась постоянной во времени, в то же время количественный анализ качественных закономерностей затруднен значительным разбросом реальных индивидуальных значений ВДМ [4, 6–8 и др.]

Результаты многочисленных опробований различных методик количественного представления материалов, изложенные в литературе, свидетельствовали об отсутствии возможности уверенного представления закономерностей изменения ВДМ во времени. Проиллюстрируем это примерами.

Так, результаты определений ВДМ в работах [17, 28, 30 и др.] представляются графически в виде совокупности точек измерений на графиках возраст – ВДМ (рис. 1а). К достоинствам этого способа можно отнести, что данные в таком виде не претерпевают никакой обработки (в том числе, никакие флуктуации не сглаживаются), однако следует отметить, что такой график весьма трудно читаем из-за неравномерности представления значений во времени.

В других работах результаты измерений представляются точками с различными барами погрешностей, при этом бары могут отражать как ошибки измерений, так и ошибки осреднений, причем интервалы осреднения не всегда одинаковы [14, 18, 20–24] (например, рис. 1б). Под осреднением, как правило, понимаются средние арифметические значения ВДМ и соответствующие им средние времена

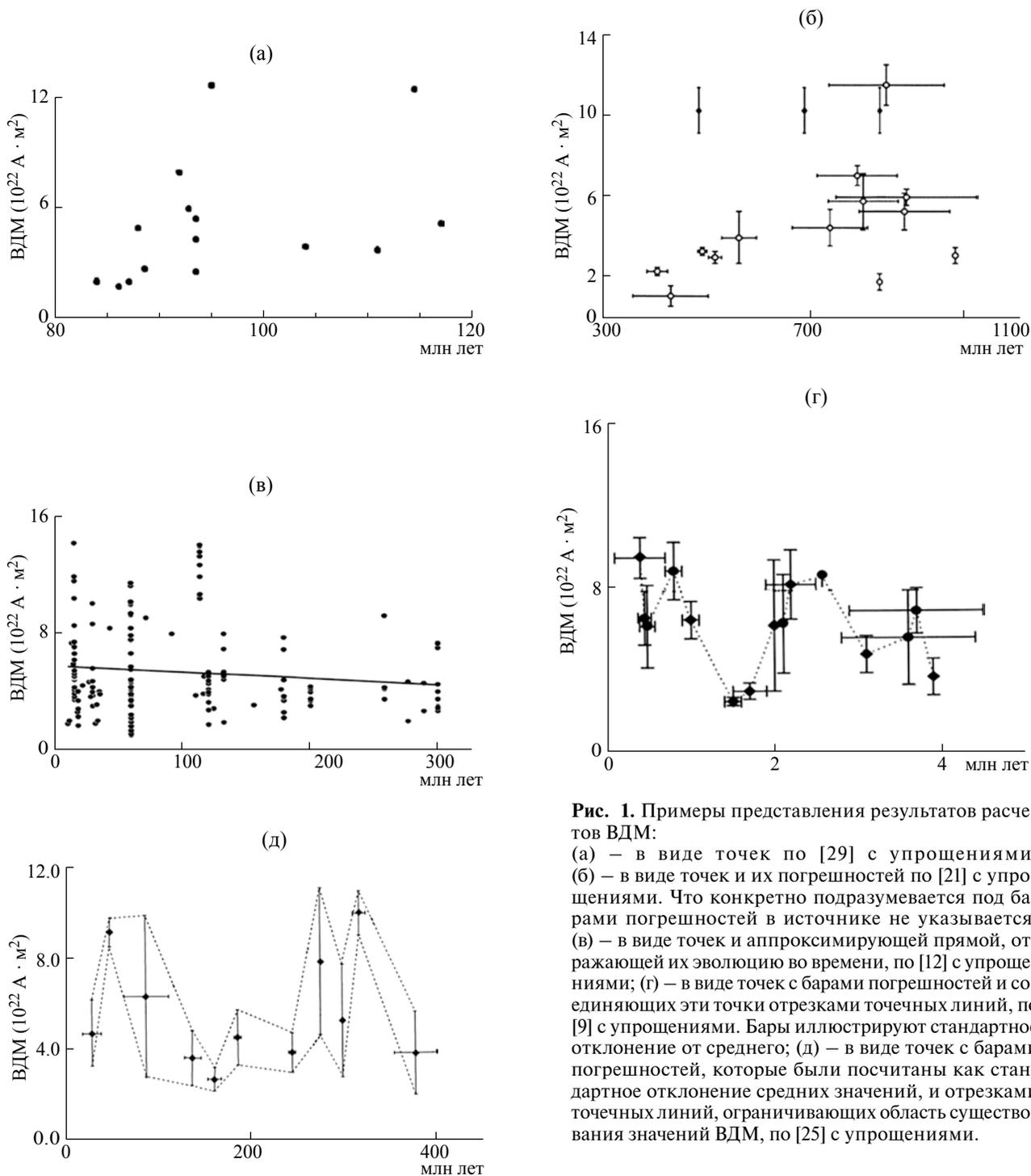


Рис. 1. Примеры представления результатов расчетов ВДМ: (а) – в виде точек по [29] с упрощениями; (б) – в виде точек и их погрешностей по [21] с упрощениями. Что конкретно подразумевается под барами погрешностей в источнике не указывается; (в) – в виде точек и аппроксимирующей прямой, отражающей их эволюцию во времени, по [12] с упрощениями; (г) – в виде точек с барами погрешностей и соединяющих эти точки отрезками точечных линий, по [9] с упрощениями. Бары иллюстрируют стандартное отклонение от среднего; (д) – в виде точек с барами погрешностей, которые были посчитаны как стандартное отклонение средних значений, и отрезками точечных линий, ограничивающих область существования значений ВДМ, по [25] с упрощениями.

за выбранный каждым автором период. Такой подход позволяет сгладить случайные флуктуации, однако не даёт полной картины происходящего на границах интервалов сглаживания.

Отметим также, что в работе [12] представлена линейная аппроксимация индивидуальных точек расчета за 300 млн лет (рис. 1в), дающая

представление об общей тенденции изменения ВДМ во времени. В работе [9] представлены точки с барами погрешностей, соединяющих такие точки отрезками точечных линий (рис. 1г). Бары иллюстрируют стандартное отклонение от среднего. Однако в работе нет единообразия выбора временных интервалов осреднения.

В работах [25, 27] представлены точки с барами погрешностей, которые были посчитаны как стандартное отклонение средних значений, и отрезками точечных линий, ограничивающих область существования значений ВДМ. Пространство между ними показывает область вероятного существования ВДМ без учета баров погрешностей определения возраста (рис. 1д). К недостаткам данного способа представления материала можно отнести то, что очерченное пространство вероятного существования ВДМ не учитывает горизонтальные планки погрешностей и часто выходит за них, что ставит под вопрос обоснованность полученного пространства существования ВДМ. Также следует отметить ещё два подхода в представлении данных: построение максимальной и минимальной огибающих.

Необходимо отметить, что перечисленные и продемонстрированные нами способы представления данных не являются полным описанием всех возможных способов. Например, существует способ представления данных в логарифмической временной шкале [2]. Данный метод очень удобен при изучении больших диапазонов величин. Логарифмическая шкала также удобна для изучения линии тренда, так как она показывает относительное изменение величин, тогда как линейная шкала — абсолютное. В других работах приводятся осреднения значений ВДМ полиномами более высоких степеней, что позволяет выяснить не только общий тренд, но и показать флуктуации ВДМ, причем чем выше степень полинома, тем более детальной становится кривая флуктуаций. Сказанное выше демонстрирует разнотилье в представлении материалов и указывает на необходимость выбора наиболее оптимального способа представления результатов расчета ВДМ, чему и посвящена настоящая работа.

АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ ВДМ

Общим моментом почти всех способов представления данных является та или иная степень осреднения рассматриваемых значений, при этом в различных литературных источниках в качестве баров погрешностей рассматриваются таковые, полученные в процессе расчетов погрешностей измерения натуральных данных, стандартных отклонений от среднего и др.

В этой связи рассмотрим известные в литературе методы для сглаживания данных ВДМ с целью элиминирования спонтанных флуктуаций.

Метод скользящего среднего был применён, например, в работе [5] для обработки собранной на то время базы значений ВДМ и соответствующих

им величин возраста образцов пород. Осреднение значений ВДМ проводилось в рамках временного скользящего окна фиксированной ширины. Для всех точек, попавших в окно, вычислялось среднее значение ВДМ и среднее значение возраста пород. Также вычислялась стандартная ошибка среднего по ВДМ и возрасту, которые представлялись на графиках в виде баров. Следующее окно расчета было смещено на полуширину окна относительно предыдущего. Еще одним методом представления данных ВДМ может служить метод медианного сглаживания, который похож на предыдущий метод с той лишь разницей, что в скользящем окне используется не средняя величина функции, а медианное значение.

Проведенный анализ результатов обработки данных ВДМ по обоим методам послужил обоснованию количественного критерия выбора размера окна и оптимального шага скольжения окна для методов осреднения и медианного сглаживания в рамках фанерозоя. В процессе исследований в настоящей работе были использованы следующие расчетные окна / шаги скольжения окна: 2 млн лет/1 млн лет, 4 млн лет/2 млн лет, 6 млн лет/3 млн лет, 8 млн лет/4 млн лет, 10 млн лет/5 млн лет, 20 млн лет/10 млн лет, 30 млн лет/15 млн лет, 40 млн лет/20 млн лет, 50 млн лет/25 млн лет, 60 млн лет/30 млн лет. Для каждого полученного значения среднего или медианы были вычислены стандартные ошибки среднего или стандартные ошибки медианы соответственно.

При этом под стандартной ошибкой среднего мы подразумеваем стандартное отклонение, деленное на квадратный корень из числа наблюдений, то есть

$$m = \frac{s}{\sqrt{n}},$$

где $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, а x_i — элемент выборки;

\bar{x} — среднее арифметическое выборки. Стандартная ошибка среднего отражает точность оценки среднего, а именно, диапазон значений, в котором должно находиться среднее значение при использовании другой выборки. Для медиан же использовалась аналогичная формула с заменой \bar{x} : среднего арифметического выборки на x_M (медиану выборки). Затем были посчитаны квадраты стандартных ошибок среднего и медианы для каждого окна расчета. Вместе с тем, необходимо отметить, что количество квадратов погрешностей при различных окнах и шагах скольжения, равно как и количество точек в каждом окне, различно, поэтому нельзя сделать достоверные выводы об оптимальном способе представления данных, основываясь только на этих расчетах.

На рис. 2 представлено распределение средних значений площадей квадратов стандартной ошибки среднего и медианы от применяемого окна. Точки на графике могут быть охарактеризованы двумя линиями распределения ошибок. Первая характеризует стандартные ошибки среднего для окон осреднения от 2 до 10 млн лет; вторая – для окон осреднения от 20 до 60 млн лет, причем первая из них имеет меньшие значения стандартных ошибок, чем вторая. Поэтому мы считаем целесообразным принять к рассмотрению окна от 2 до 10 млн лет.

Также для описания процесса важным параметром является соотношение между общим количеством получившихся интервалов при использовании того или иного окна и количеством интервалов, в которые попадает хотя бы одна точка (под интервалом мы понимаем количество полученных разбиений для того или иного окна). К сожалению, в связи с крайне неравномерным распределением данных ВДМ во времени эти цифры не совпадают на большинстве интервалов, что показано на рис. 3. Максимальную заполняемость интервалов можно наблюдать, начиная с окна, равного 50 млн лет, однако такое распределение не является оптимальным по двум причинам. Первая причина заключается в вышеизложенных выводах о характере изменения стандартных ошибок среднего и медианы в зависимости от размера окна. А вторая причина в том, что полученное итоговое количество значений при таких больших окнах как 50 млн лет сравнительно небольшое, и мы получим лишь общую тенденцию изменения ВДМ без детализации. Таким образом, следует ограничиться рассмотрением процента “заполненности” интервалов для окон от 2 до 10 млн лет. Как мы видим, минимальный процент доли интервалов, в которых есть хотя бы одна точка, а именно 47.42%, приходится на окно в 2 млн лет, что свидетельствует о недостаточной плотности начальных данных и о невозможности построения равномерного распределения, используя такое окно; в то же время максимальный процент, а именно 79.82%, приходится на окно в 10 млн лет.

При выборе между медианным сглаживанием и средним мы руководствуемся тем соображением [1], что медиана является примером более устойчивой статистики, чем среднее. На нее не влияют величины слишком “больших” или “малых” значений, так называемые выбросы или “хвосты” распределения, которые могут быть связаны, например, с ошибками измерений [1]. В случае симметричного, например, гауссовского распределения, теоретическое значение медианы совпадает со средним значением ряда, а выборочная медиана является альтернативной оценкой среднего значения, но в нашем случае распределение

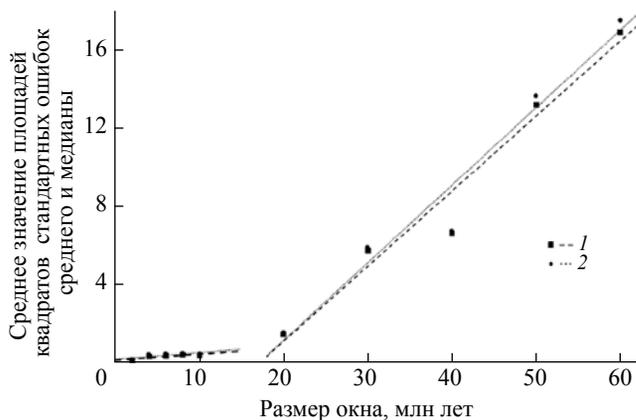


Рис. 2. Зависимость осредненных значений квадратов величины стандартной ошибки среднего (1) и медианы (2) в условных единицах от размера окна скольжения.

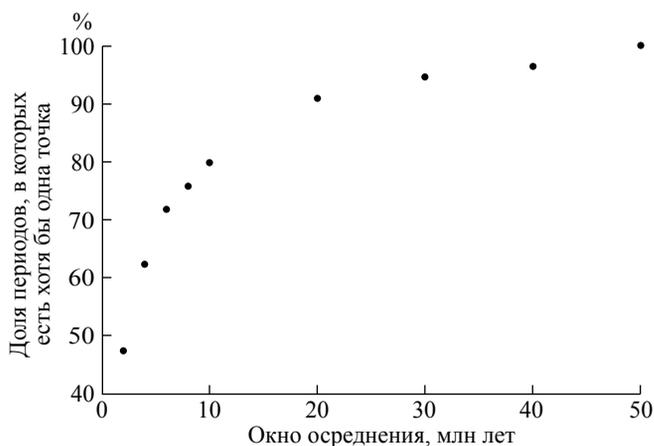


Рис. 3. Зависимость доли периодов (в процентах), в которых есть хотя бы одна точка, от величины окна скольжения (осреднения).

несимметрично. Таким образом, сглаживание медианой обычно приводит к более гладким или, по крайней мере, более “надежным” кривым, по сравнению со скользящим средним с тем же самым окном, даже несмотря на большие значения стандартных ошибок.

Еще одним способом представления данных является их интерполяция. В настоящей работе представлен алгоритм, основанный на нахождении наименьшего расстояния между группой точек, попавших в исследуемое окно, и точками, имеющими значение времени, равное середине исследуемого окна. Для обработки данных по ВДМ производилась интерполяция ряда в равноудаленных друг от друга точках на промежутке от 0 до 541.0 млн лет

(в соответствии с работой [15], развивающей работу [3]). В итоге был разработан следующий алгоритм для шага размером d (в млн лет). Для подсчета значения i -й точки ряда ВДМ выбирались все точки исходных данных, попавшие в окно $VDM(t_k): t_k \in A_i = [t_i - d/2, t_i + d/2), t_i = d \cdot i$ далее на прямой $t_i = d \cdot i$, которая по сути является серединой у окна соответствующего интервала, мы искали такое значение ВДМ, для которого будет минимальна сумма расстояний от искомой точки до всех точек исходных данных, попавших в окно. Определение расстояния велось в плоскости $x \cdot y$, где x – это время в млн лет, а y – это значения ВДМ в $A \cdot m^2$. То есть минимизировалось значение $\sum_{t_k \in A_i} \sqrt{(VDM(t_k) - VDM(t_i))^2 + (t_k - t_i)^2}$ для всех точек исходных данных, где t_k находится в исследуемом окне. Таким образом, полученная точка, учитывающая все значения ВДМ, попавшие в исследуемое окно, испытывает смещение в сторону наибольшего их скопления.

Для иллюстрации описанного алгоритма рассмотрим следующий пример (рис. 4). В окно с шириной $d=2.5$ млн лет для интервала 41.25–43.75 млн лет попали 5 точек с соответствующим значением времени. Для нахождения интерполированной точки для всех точек на прямой $t = 42.5$ млн лет, равной середине исследуемого окна, с дискретностью шага в 0.0001 $A \cdot m^2$ производился расчет суммы расстояний ($\sum D_i$) между ней и исследуемыми точками изначальных

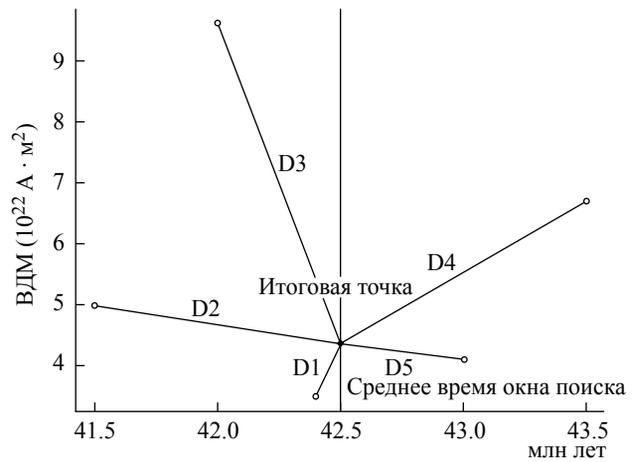


Рис. 4. Пример применения алгоритма интерполяции данных (см. текст).

данных. Далее находилась такая точка, для которой данное число будет минимальным. На рисунке – сумма длин отрезков D1 – D5 минимальна для искомой точки.

Поиск оптимального шага интерполяции производился среди значений: 1, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 7.5, 8, 9, 10, 11, 12, 12.5, 13, 14, 15, 20, 25 и 30 млн лет. Для оценки точности полученных значений использовались среднеквадратические отклонения (напомним, что под среднеквадратическим отклонением мы подразумеваем величину

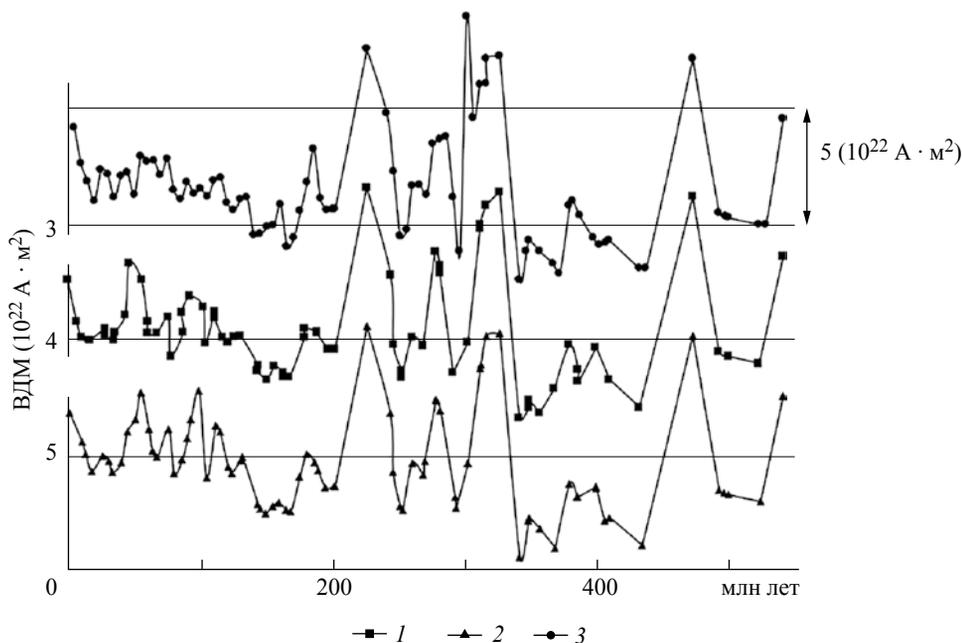


Рис. 5. Результаты расчета ВДМ методами скользящего среднего (1), медианного сглаживания (2) и интерполяции (3) данных. Во всех случаях расчетные погрешности не превосходят $\pm 12\%$.

$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$, где x_i – элемент выборки; \bar{x} – среднее арифметическое выборки).

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ВДМ ДЛЯ ФАНЕРОЗОЯ

ВДМ является важнейшей характеристикой поведения земного магнитного поля во времени. В работе [4] было показано, что в основу банка данных ВДМ могут быть положены сведения взаимно дополняющих друг друга баз данных IAGA PALEOINTENSITY DATABASE (которая доступна на сайте Геофизического центра в г. Боулдер, Колорадо, США [16]) и базы данных обсерватории Борок [13]. Данные этих баз были дополнены нами результатами ряда исследований, детальный список которых представлен в работе [4], а также в [10, 11].

На рис. 5 представлены результаты расчетов ВДМ описанными тремя методами в окне 10 млн лет с шагом 5 млн лет. Графики не имеют между собой существенных региональных различий. Однако необходимо отметить, что локальные различия характера поведения кривой, полученной методом интерполяции, и кривых, полученных методами медианного сглаживания и скользящего среднего, более существенны, чем различия между двумя последними. Также важен тот факт, что, несмотря на одинаковый размер окна и шага скользящего, кривые, полученные методами медианного сглаживания и скользящего среднего, тоже отличаются характером локальных особенностей. Это, возможно, объясняется тем, что в случае метода медианного сглаживания влияние случайных выбросов и ошибок минимально в отличие от метода скользящего среднего. В то же время, для последнего полумиллиарда лет в целом, несмотря на различия в статистических подходах описания, выявляется общность поведения кривых, представляющих результаты расчетов поведения ВДМ во фанерозое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в результате проведенного анализа данных ВДМ для фанерозоя получено, что значения ВДМ неравномерно распределены во времени. Это в значительной мере затрудняет качественный и количественный анализ эволюции магнитного поля. Анализ данных позволяет обосновать методики представления фанерозойской выборки данных. Методики предусматривают представление данных с помощью метода интерполяции, а также скользящего среднего и скользящего медианного значений в окне 10 млн лет с шагом скользящим в 5 млн лет.

Анализ результатов расчетов распределения ВДМ в фанерозое по всем трем методикам демонстрирует схожесть региональных особенностей при многообразии индивидуального характера локальных ундуляций во времени. Одновременно, вариации напряженности дипольной составляющей магнитного поля Земли прямо свидетельствуют о необходимости их учета при моделировании палеомагнитных аномалий, рожденных на мезо-кайнозойских осях спрединга, а также при моделировании инверсионного магнитоактивного слоя для участков океанической коры древнего геологического прошлого, возможно существующих на планете Земля.

Методические аспекты проведенного исследования разрабатывались в рамках Государственного задания проект № 0149-2014-0030 и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-00075), а результативная часть исследований выполнена в рамках плана аспирантской работы аспирантки второго года А.А. Игнатовой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мостеллер Ф., Тьюки Дж. Анализ данных и регрессия // Финансы и статистика. 1982. Вып. 2. С. 239.
2. Шалимов С.Л. О причинах суперхронов геомагнитного поля // Геофизические исследования. 2006. Вып. 6. С. 59–70.
3. Шрейдер А.А. Магнетизм океанической коры и линейные палеомагнитные аномалии // Физика Земли. 1992. № 6. С. 59–70.
4. Шрейдер А.А., Игнатова А.А., Шрейдер Ал.А. и др. Эволюция вычислений виртуального дипольного момента Земли для восстановления параметров инверсионного магнитоактивного слоя океана // Океанология. 2016. Т. 56. № 3. С. 463–470.
5. Шрейдер А.А., Шрейдер Ал. А., Варга П., Денис К. Изменение величины геомагнитного диполя в интервале хронов С1-М43 // Океанология. 2005. Т. 45. № 5. С. 785–789.
6. Шрейдер А.А., Шрейдер Ал. А., Варга П., Денис К. Изменение величины геомагнитного диполя за последние 400 млн лет // Океанология. 2008. Т. 48. № 2. С. 271–275.
7. Шрейдер А.А., Шрейдер Ал. А., Варга П., Денис К. Вариации величины виртуального дипольного момента в фанерозое // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 537–541.
8. Щербаков В.П., Сычева Н.К. Об изменении величины геомагнитного диполя за геологическую историю Земли // Физика Земли. 2006. № 3. С. 25–30.

9. *Alva-Valdivia L., Goguitchaichvili A., Urrutia-Fucugauchi J.* Further constraints for the Plio-Pleistocene geomagnetic field strength: new results from the los Tuxtlas volcanic field (Mexico) // *Earth Planet. Space.* 2001. V. 53. P. 873–881.
10. *Biggin A., McCormik A., Roberts A.* Paleointensity database updated and upgraded // *EOS.* 2010. V. 91. № 2. P. 15.
11. *Biggin A.J., Stirk G., Langeris C.* The intensity of the geomagnetic field in the late Archaean: new measurements and an analysis of the updated IAGA paleointensity database // *Earth Planet. Space.* 2009. V. 61. P. 9–22.
12. *Biggin A.J., Thomas D.N.* Analysis of long-term variations in the geomagnetic poloidal field intensity and evaluation of their relationship with global geodynamics // *Geoph. J. I.* 2003. V. 152. P. 392–415.
13. *Borokpint* // <http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index/html.2012>.
14. *Donadini F.* Features of the Geomagnetic field during the Holocene and Proterozoic // *Report Series in Geophysics.* 2007. V. 58. P. 113–128.
15. *Gradstein F., Ogg J., Schmitz M., Ogg G.* The Geologic Timescale 2012 // Amsterdam: Elsevier, 2012. 1139 p.
16. IAGA paleointensity database // www.isteam.univmontp2.fr/PERSO/perrin/2015.
17. *Juarez M., Tauxe L.* The intensity of time averaged geomagnetic field: the last 5 My // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2000. V. 175. P. 169–180.
18. *Macouin M., Valet J., Besse J. et al.* Low paleointensities recorded in 1 to 2.4 Ga Proterozoic dykes, Superior province, Canada // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 213. P. 79–95.
19. *Morley L., Larochell A.* Paleomagnetism as a mean of dating geological events // *Roy. Soc. Canada Spec. Publ.* 1964. V. 8. 521 p.
20. *Pan Y., Hill M., Zhu R., Shaw J.* Future evidence for low intensity of the geomagnetic field during the early Cretaceous time: using the modified Shaw method and microwave technique // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 157. P. 553–564.
21. *Salminen J., Donadini F., Pesonen L.J. et al.* Paleomagnetism and petrophysics of the Janisjarvi impact structure, Russian Karelia // *Meteoritics&Planetary Science.* 2006. V. 41. № 12. P. 1853–1870.
22. *Selkin P., Gee J., Meurer W., Hemming S.* Paleointensity record from the 2.7 Ga Stillwater Complex, Montana // *Geochem. Geoph. Geos.* 2008. V. 9. № 12. 23 p.
23. *Sumita I., Hatakeyama T., Yoshihara A., Hamano Y.* Paleomagnetism of late Archean rocks of Hamersley basin, Western Australia and the paleointensity at early Proterozoic // *Phys. Earth Planet. Int.* 2001. V. 128. P. 223–241.
24. *Tarduno A., Cotterell R., Smirnov A.* The paleomagnetism of single silicate crustals: recording geomagnetic field strengce during mixed polarity intervals, superchrons, and inner core growth // *Rev. Geophys.* 2006. V. 41. RG1002. P. 1–31.
25. *Thomas D.N., Biggin A.J.* Does the mesozoic dipole low really exist? // *Eos.* 2003. V. 84. № 11. P. 111–113.
26. *Vine F., Matthews D.* Magnetic anomalies over oceanic ridges // *Nature.* 1963. V. 199. P. 947–949.
27. *Wang D., Van der Voo R., Peacor D.* Why is the remanent magnetic intensity of Cretaceous MORB so much higher than that of mid to late Cenozoic MORB? // *Geosph.* 2005. V. 1. P. 138–146.
28. *Yamamoto Y., Tsunakawa H.* Geomagnetic field intensity during the last 5Myr: LTD-DHT Shaw palaeointensities from volcanic rocks of the Society Islands, French Polynesia // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 162. P. 79–114.
29. *Zhu R., Hoffman K., Pan Y., Li S. et al.* Evidence for weak geomagnetic field intensity prior to the Cretaceous normal superchron // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 136. P. 187–199.
30. *Zhu R., Lo C., Ruiping Shi R., Shi G. et al.* Palaeointensities determined from the middle Cretaceous basalt in Liaoning Province, northeastern China // *Phys. Earth and Planet. Int.* 2004. V. 142. P. 49–59.

Changes of the Virtual Dipole Moment the Earth's Magnetic Field Presentation during the Phanerozoic

A. A. Schreider, A. A. Ignatova, Al. A. Schreider, A. E. Sazhneva, P. Yu. Pugin

The virtual dipole moment (VDM) is unevenly distributed in time, which greatly complicates qualitative and quantitative analysis of its evolution. Along with the method of the moving average and median values represented for the first time the technique of quasi-uniform data representation (interpolation method) and the results of calculations by this method the evolution of the VDM for the Phanerozoic evolution is firstly presented.