

УДК 550.384

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОЙ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ МИРОВЫХ БАЗ ДАННЫХ ПО ПАЛЕОМАГНЕТИЗМУ И ПАЛЕОНАПРЯЖЁННОСТИ ПО СХЕМЕ БОЛЬШОГО ГАУССОВСКОГО ПРОЦЕССА

Н.К. Сычева, В.П. Щербаков, А.В. Хохлов

Аннотация

Сделан обзор современных мировых баз данных по палеомагнетизму и палеонапряжённости. Проведен анализ расчетных и эмпирических данных по положениям виртуального геомагнитного полюса и интенсивности геомагнитного диполя. Приведены результаты численного моделирования вековых вариаций геомагнитного поля по схеме большого гауссовского процесса (БГП) и их сравнение с данными, представленными в современных мировых базах данных по палеонапряжённости. Дисперсии положения виртуального геомагнитного полюса (VGP), рассчитанные по синтетическим и экспериментальным данным (эпоха Брюнеса, изверженные породы), близки друг к другу, что подтверждает справедливость теоретической модели. Существенной оказалась разница в дисперсиях виртуального геомагнитного диполя (VADM) – по всем рассмотренным базам данных она заметно выше, чем рассчитанная по модели БГП. Наиболее вероятной причиной этого является вклад в дисперсию неучтённых экспериментальных ошибок измерения величины VADM.

Ключевые слова: палеомагнетизм, палеонапряжённость, большой гауссовский процесс, модель вековых вариаций, базы данных.

Введение

Вековыми вариациями геомагнитного поля называются изменения компонент его вектора \mathbf{V} , происходящие на интервалах времени от года до 10 тыс. лет. Источником вековых вариаций являются процессы в жидком ядре Земли, в результате которых генерируется главное геомагнитное поле. В [1] полное описание вектора геомагнитного поля \mathbf{V} во времени и пространстве дается в виде разложения его потенциала Ψ по сферическим функциям с зависящими от времени коэффициентами этого разложения g_l^m и h_l^m :

$$\Psi = \frac{R_E}{\mu_0} \sum_{l=1}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{R_E}{r} \right)^{l+1} P_l^m(\cos \theta) (g_l^m \cos m\varphi + h_l^m \sin m\varphi). \quad (1)$$

Здесь R_E – радиус Земли, r – расстояние от центра Земли до точки, где вычисляется величина потенциала Ψ , μ_0 – магнитная постоянная, P_l^m – присоединённые полиномы Лежандра, φ и θ – угловые сферические координаты с полярной осью, направленной вдоль оси вращения Земли. Вековые вариации хорошо описываются в рамках модели так называемого большого гауссовского процесса

(БГП), основное положение которой состоит в том, что совокупность коэффициентов g_i^m и h_i^m разложения (1) можно описать в терминах многомерного стационарного гауссовского процесса [1]. Для тестирования этого предположения и установления свойств соответствующего случайного процесса до последнего времени использовались главным образом данные по угловым элементам геомагнитного поля [2].

В настоящей работе проведено сравнение результатов численного моделирования вековых вариаций геомагнитного поля по схеме БГП и данных, представленных в современных мировых базах данных по палеонапряжённости.

Обзор современных мировых баз данных по палеомагнетизму и палеонапряжённости

Сайт Геофизического центра данных в г. Боулдер (Колорадо, США) (National Geophysical Data Center, NGDC) <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/paleo.shtml> обеспечивает доступ к семи базам данных по палеомагнетизму и палеонапряжённости, которые содержат сведения по координатам палеополюсов, палеомагнитным направлениям, абсолютным значениям палеонапряжённости: Global Geomagnetic Database, Archeomagnetic directional base, Magnetostratigraphy Database, Paleosecular Variation, Polarity Transitions Database, Paleointensity Database (Pint00), Secular Variation from Lake Sediments (Secvr00). Для всех баз данных, размещенных на этом сайте, последнее обновление было выполнено в 2000 г.

Наиболее надёжные абсолютные определения палеонапряжённости производятся на изверженных породах, несущих термоостаточную намагниченность. Первый вариант мировой базы данных по определениям палеонапряжённости на изверженных породах появился в 1995 г. [3], в 1997 г. база данных IAGA Paleointensity Database (IPD) была разработана в СУБД Access в её современном виде [4–6], дополнена новыми данными и помещена на указанном выше сайте NGDC, последняя по времени версия этой БД (2000 г.) доступна по адресу ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/Solid_Earth/Paleomag/access/ver3.5/access2000/PINT00.MDB. Другая компиляция БД IPD доступна с сайта <http://earth.liv.ac.uk/IAGA/> (Andy Biggin, Department of Earth, Ocean and Ecological Sciences at the University of Liverpool, U.K.). Доступ к этой БД осуществляется через web-интерфейс, также есть возможность скачать БД в формате Excel, БД содержит 4171 запись (3941 определение VDM, 306 публикаций). Последнее обновление БД – 2013 г.

В 2001 г. в Геофизической обсерватории «Борок» ИФЗ РАН БД IPD была дополнена новыми определениями палеонапряжённости $H_{др}$ и помещена для общего пользования на сайте ГО «Борок» <http://www.brk.adm.yar.ru/palmag/index.html> под именем BOROKPINT.MDB. Подробное описание БД BOROKPINT приведено в работе [7]. В МБД содержатся сведения о координатах места отбора образцов, палеонаправлениях, палеонапряжённости, методе определения палеонапряжённости, значения виртуального диполя (VDM). МБД включает в себя практически все опубликованные данные, полученные по изверженным породам и обожжённым ими осадкам. 34% всех определений VDM в БД выполнены на молодых (до миллиона лет) породах, 94% определений VDM – для фанерозоя. БД постоянно обновляется включением в неё новых определений, опубликованных

в мировой литературе, и на данный момент содержит 4327 записей (4096 определений виртуального дипольного момента (VDM)), подавляющее большинство тех записей БД, которые не содержат значения VDM (92%), получено из работ, выполненных до 2000 года. В современных работ по абсолютному значению палеонапряжённости значение VDM, как правило, присутствует. В базу включаются все определения VDM, полученные разными методами с различной степенью достоверности, при этом 77% определений VDM, представленных в БД BOROKPINT, получены по общепризнанной методике Телье [8] или её модификации [9]. В последнее десятилетие ужесточаются требования к надежности палеомагнитных данных [10], обязательным условием при определении $H_{др}$ по методике Телье является выполнение дополнительных нагревов до более низких температур – так называемая процедура check-points, позволяющая отследить химические изменения в породах. Этому условию удовлетворяют 70% из всей совокупности определений VDM по методу Телье, из них чуть больше половины (1023 определения VDM) соответствуют критериям надежности палеомагнитных данных – использование не менее трех образцов для определения палеонапряжённости, относительная ошибка определения $H_{др}$ не более 15% [4, 11]. Большая часть «надежных» определений (72%) получена за последние 15 лет. Необходимо отметить, что в свое время в ГО «Борке» ИФЗ РАН А.С. Большаковым и Г.М. Солодовниковым был получен большой массив данных по абсолютным значениям $H_{др}$. В своих работах эти ученые не упоминали о выполнении процедуры “check-points”, однако похожая процедура с повторными нагревами А.С. Большаковым и Г.М. Солодовниковым выполнялась [12]. Тем не менее при анализе баз данных по абсолютным значениям $H_{др}$ их работы, к сожалению, в расчет не принимаются, в противном случае массив «надежных» определений VDM увеличился бы почти на треть (530 определений VDM). Последнее обновление базы данных BOROKPINT – январь 2014 г.

К образованию остаточной намагниченности при искусственном обжиге глины приводит тот же механизм, который действует в остывающей лаве. Археомagnetизм изучает остаточную намагниченность археологических памятников (кирпичей, глиняной посуды и др.). БД ArcheoInt содержит археомагнитные данные за последние 10000 лет, доступна с веб-сайтов EarthRef.orgDigitalArchive (ERDA) <http://earthref.org/cgi-bin/er.cgi?s=erda.cgi?n=887> (версия 2008 г.) и <http://archeoint.free.fr/> (версии 2008 и 2009 гг.) [13]. В основу БД ArcheoInt положены данные глобальной геомагнитной модели CALS7K.2 [14], содержащей абсолютные значения палеонапряжённости за последние 7000 лет. БД ArcheoInt выполнена в формате Excel, содержит 3926 записей (с определениями VADM) по 206 публикациям. БД состоит из четырех таблиц, содержащих информацию о географических координатах (месте отбора), материале, возрасте, методе определения палеонапряжённости, наклонение, склонение, кучность, угол доверия, палеонапряжённость, ошибка определения $H_{др}$, VADM и, когда это возможно определить, VDM. Подробное описание таблиц БД приведено в работе [13]. 75% всех определений VADM (VDM) получены до 1999 года. 60% абсолютных определений палеонапряжённости выполнены методом Телье, из них почти половина (46%) – с использованием процедуры “check-point”. Последнее обновление БД – 2009 год.

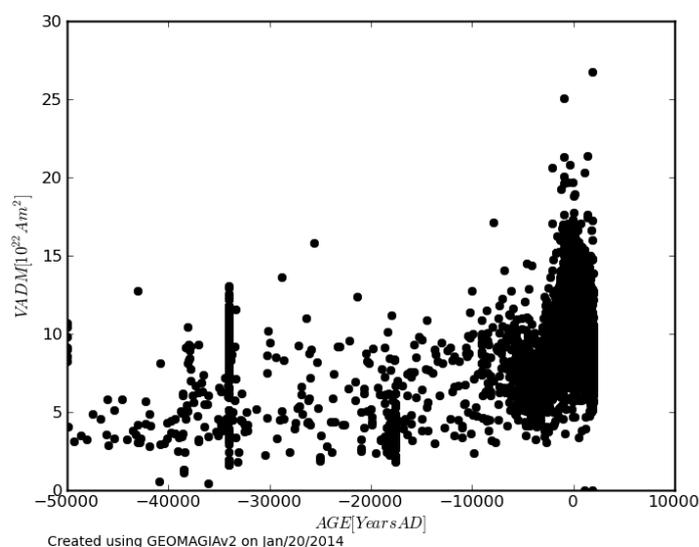


Рис. 1. БД GEOMAGIA50 – зависимость VADM от времени, отбор данных для 50000 лет

Доступ через web-интерфейс к археомагнитным данным предоставляет БД GEOMAGIA50 <http://geomagia.ucsd.edu/> [15, 16] (рис. 1). Эта БД реализована в широко распространенной клиент-серверной СУБД с открытым исходным кодом MySQL, содержит более 8000 определений направления и величины геомагнитного поля за последние 50000 лет. БД GEOMAGIA50 позволяет: сохранять отобранные по запросу пользователя данные в текстовых файлах, рассчитывать глобальные геомагнитные модели ARCH3k.1, CALS3k.3 [17], CALS3k.4 [18], CALS7k.2 [13] и CALS10k.1b [19], основанные на синтезе археомагнитных данных и данных по осадкам и лавам, визуализировать данные, используя Google Earth (программа компании Google для работы с трехмерной моделью Земли).

Наряду с определениями по изверженным породам и археомагнитными определениями, при анализе поведения геомагнитного поля в геологическом прошлом широко используются результаты, полученные по осадочным породам. Данные по вековым вариациям для озерных осадков содержит База данных SECULAR VARIATIONS DATABASE (по 36 публикациям 1974–1997 гг.) <http://www.mmmt.net/db/0/0/ftp.ngdc.noaa.gov/geomag/Paleomag/access/ver3.5/access2000>. БД SecVR00 создана в формате Access, состоит из 8 основных таблиц, содержащих информацию о географических координатах, наклонение, склонение, возраст осадков, метод определения возраста и ряд других характеристик. К сожалению, в этой БД некорректно работает режим запроса по отбору данных, видимо, по причине неправильно указанных внешних ключей, используемых для связи между таблицами, ряд таблиц не заполнен, последнее обновление БД – 2000 год.

Модель Sint-2000 [20] представляет временную зависимость величины VADM за последние 2 млн лет, оцифрованную с шагом в 1 тыс. лет, модель построена путём синхронизации и осреднения величин относительной палеонапряжённости, полученной на ряде кернов океанических и морских осадков. Текстовый файл с данными по модели Sint-2000 (возраст, относительная, абсолютная

палеонапряжённость, дисперсия, ошибка среднего) можно получить по личному запросу у автора. Модель Sint-2000 (версия 2005 г.) в настоящее время активно используется как основной источник палеомагнитных данных по осадочным породам за последние 2 млн лет.

Таким образом, среди общедоступных баз данных по палеомагнетизму и палеонапряжённости регулярно обновляются новыми данными лишь БД по изверженным породам BOROКPINT и БД PINT (A. Biggin) и БД по археомагнитным данным GEOMAGIA50. По БД ArcheoInt последнее обновление было в 2009 г., БД SecVR00 и PINT00 не обновлялись с 2000 года.

Анализ расчетных и эмпирических данных по положениям VGP и интенсивности геомагнитного диполя

Для количественного рассмотрения этого вопроса воспользуемся моделью БГП и положим, что автокорреляционная функция любого коэффициента есть экспоненциально убывающая функция $K(t) = \exp(-t/\lambda)$. Для стационарного гауссовского процесса $R(t)$ с дисперсией $\sigma = 1$ можно определить соответствующий ему усреднённый во времени процесс

$$R_{\tau}(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} R(t) dt.$$

Как показано А. Хохловым¹, дисперсия усреднённого процесса для экспоненциально затухающей $K(t)$ есть

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{2\lambda^2}{\tau^2} \left[\frac{\tau}{\lambda} + \exp\left(-\frac{\tau}{\lambda}\right) - 1 \right].$$

При $\tau \rightarrow \infty$ эта функция имеет асимптотическое представление $\sigma_{\tau} = \sqrt{2\lambda/\tau}$, откуда видно, что дисперсия уменьшается в два раза при $\tau/\lambda \cong 10$. Поскольку времена автокорреляции λ убывают с ростом номера зональной гармоники l , усреднение вектора поля будет происходить в первую очередь для гармоник с относительно высокими индексами l . Что касается вариаций дипольного члена с $l = 1$, то они эффективно подавляются лишь для осадков с невысокой скоростью накопления при τ не менее 5000 лет (табл. 1).

Табл. 2 содержит средние значения и дисперсии зональных гармоник разложения (1). Обе таблицы построены согласно модели Quideller – Courtillot (QC) [21]. Отметим, что различные модели БГП неоднократно тестировались на основе сравнения их результатов с эмпирическими данными по положению палеомагнитных полюсов, полученными по осадочным породам и суммированными в различных палеомагнитных базах данных [22, 23]. Результаты этих тестирований показали, что параметры модели QC наилучшим образом согласуются с эмпирическими распределениями положений VGP, полученными для эпохи Брюнеса.

¹ Хохлов А. Вековые геомагнитные вариации. Палеомагнетизм в осадочных породах и статистика // Физика Земли. – 2014. – В печати.

Табл. 1

Времена автокорреляции λ для членов разложения (1) с индексом l

l	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
λ	667	150	133	119	105	93	83	73	65	51

Табл. 2

Параметры модели QC (мкТ)

$E(g_1^0)$	$E(g_2^0)$	σ_1^0	σ_1^1	σ_2^0	$\sigma(g_2^1)$	$\sigma(h_2^1)$	σ_2^2	α
-30.0	-1.2	3.0	3.0	1.3	4.3	4.3	1.3	27.7

На рис. 2 представлены результаты прямого численного моделирования вековых вариаций положения VGP по схеме БГП при учёте 5 гармоник и данных табл. 1 и 2. При моделировании имитировалась эпоха Брюнеса, то есть расчёт вёлся по временному интервалу 0–780 тыс. лет. На рис. 2, *a* показаны мгновенные положения полюсов ($\tau = 0$), рассчитанные по модели БГП для 209 случайного момента времени. VGP определялись каждый раз для нового случайного местоположения в интервале времени 0–780 тыс. лет. Результаты этого расчёта естественно сравнить с данными по изверженным породам. С этой целью на рис. 2, *б* приведены положения VGP, полученные для эпохи Брюнеса по изверженным породам согласно МБД PINT, содержащей только те данные, которые удовлетворяют критериям отбора (см. выше) и по которым есть значения наклона, склонения и определения палеонапряжённости. В этот массив данных мы включили и определения, полученные А.С. Большаковым и Г.М. Солодовниковым по эпохе Брюнеса, в сумме получили 209 определений. На рис. 2, *в* и *г* представлены положения VGP, рассчитанные по базам данных ArcheoInt (метод Телье, check-point) и GEOMAGIA50 соответственно. На рис. 2, *д* приведены положения VGP, полученные по осадкам оз. Байкал [24], временной интервал 0.29–84.9 тыс. лет, на рис. 2, *е* приведены положения VGP, полученные по осадкам озера Моно (Калифорния, США) [25], временной интервал 12.25–34.97 тыс. лет. Дисперсии VGP, рассчитанные по синтетическим и экспериментальным данным близки друг к другу (табл. 3), что подтверждает справедливость теоретической модели.

Рассмотрим теперь распределение VADM, характеризующее интенсивность диполя [26]:

$$VADM = \frac{4\pi BR_E^3}{\mu_0 \sqrt{1 + 3 \sin^2 \varphi}}$$

Выбор VADM в данном случае связан с тем, что при работе с кернами осадков определяется именно VADM (а не VDM), и корректное сравнение данных по вулканитам и осадкам может быть выполнено только при использовании VADM. Величина VADM для каждого момента времени определялась по вектору геомагнитного поля \mathbf{V} , рассчитанного по модели БГП. На рис. 3 представлены гистограммы «мгновенного» и усреднённого распределений VADM(t), построенных с помощью модели БГП с $\tau = 0$ и $\tau = 1000$ лет соответственно. VADM вычислялась для 440 случайных моментов времени и случайного местоположения

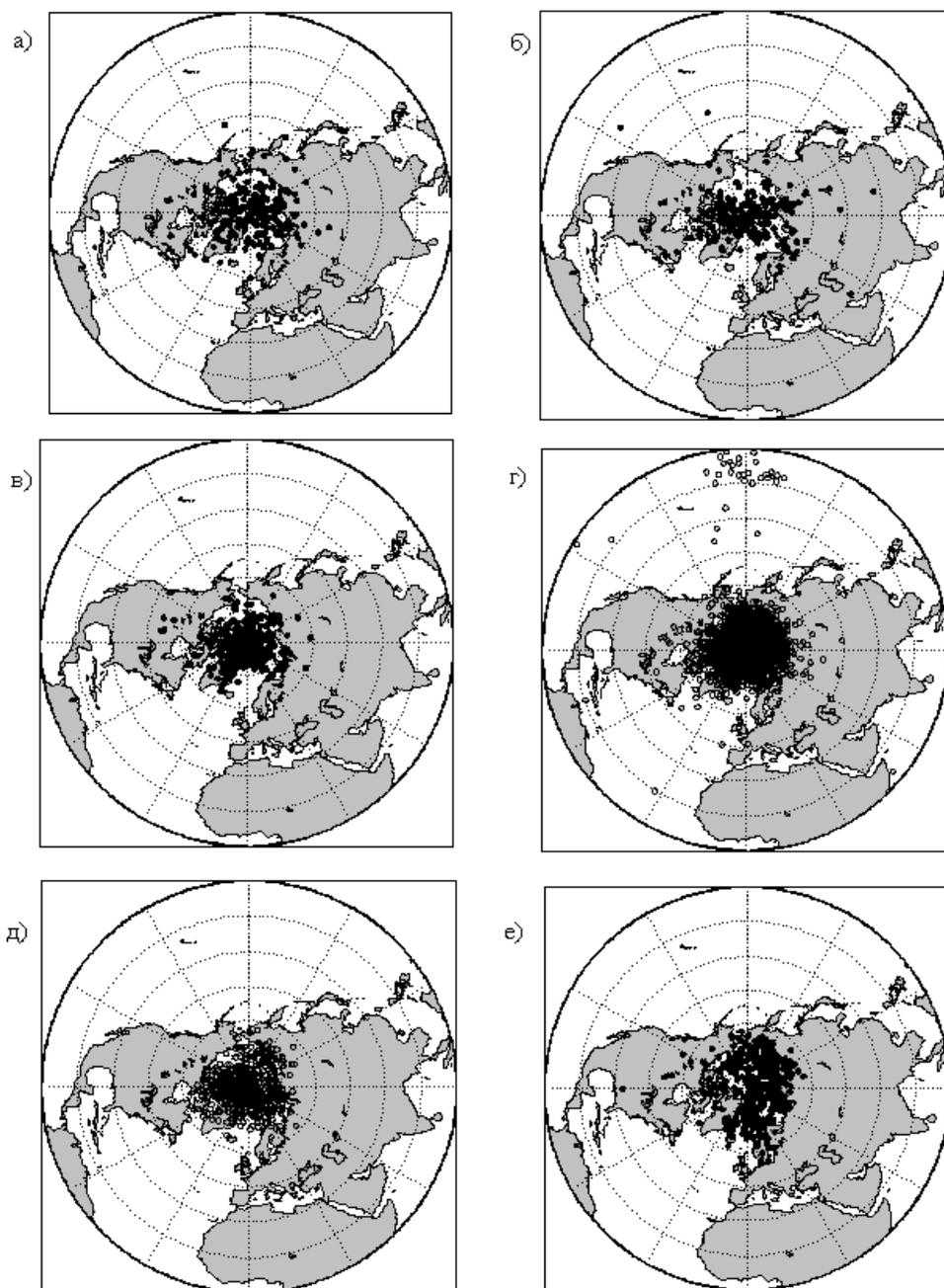


Рис. 2. *а)* мгновенные положения VGP ($\tau = 0$), рассчитанные по модели БГП для 209 случайных моментов времени; *б)* положения VGP для эпохи Брюнеса по 209 данным из МБД PINT; *в), г)* положения VGP по археомагнитным данным ArcheoInt и GEOMAGIA50 соответственно; *д), е)* положения VGP по озерным осадкам, БД SecVR00

в интервале 0–780 тыс. лет. Аналогично расчётам с VGP, дисперсия распределения VADM также значительно уменьшилась в результате усреднения. Здесь и далее магнитный момент измеряется в единицах 10^{22} Ам².

Табл. 3

Дисперсия VGP (пояснения в тексте)

БД	Модель БГП, $\tau = 0$	PINT	ArcheoINT	GEO- MAGIA50	SecVR00 Байкал	SecVR00 Mono Lake
Число определений	209	209	337	3788	523	404
σ_{VGP} (град)	16.9	16.7	12.2	15.6	12.7	17.7

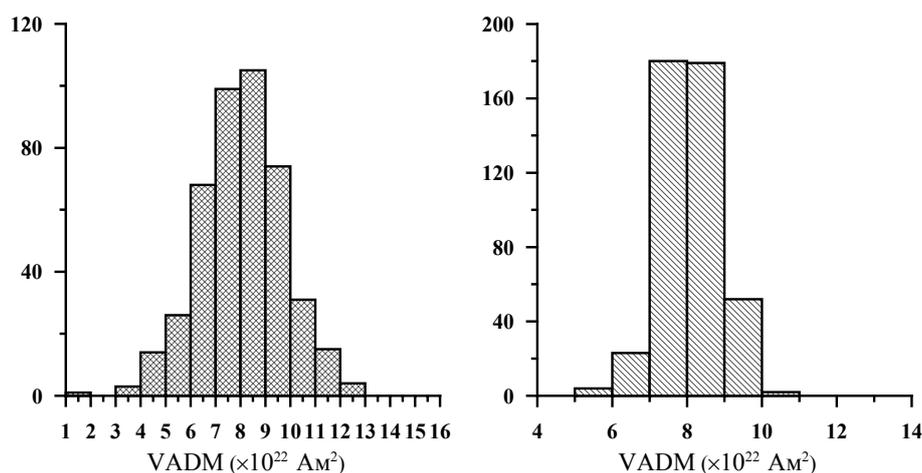


Рис. 3. Слева – гистограмма «мгновенных» величин $VADM(t)$ ($\tau = 0$), среднее $VADM = 8.06$, $\sigma_{VADM} = 1.7$. Справа – гистограмма «усреднённых» величин $VADM(t)$ ($\tau = 1000$ лет), среднее $VADM = 8.1$, $\sigma_{VADM} = 0.8$

Табл. 4

Средние значения VADM и дисперсии (пояснения в тексте)

БД	Модель БГП, $\tau = 0$	PINT	ArcheoINT	GEO- MAGIA50	Модель БГП $\tau = 1000$	Sint-2000
Число определений	440	440	1335	4631	440	760
VADM	8.07	7.7	9.8	9.2		7.53
σ_{VADM}	1.68	2.5	2.2	2.7	0.78	1.61

Для сравнения с экспериментом на рис. 4 показаны гистограммы величин VADM, полученных в результате обработки МБД PINT по палеонапряжённости (метод Телье, критерии отбора и данные А.С. Большакова, Г.М. Солодовникова), по археомагнитным данным за последние 10000 лет (ArcheoInt, метод Телье, check-point), по данным модели Sint-2000 для осадков, по БД GEOMAGIA50. Как видно, средняя величина VADM по МБД PINT и модели Sint-2000 меньше, чем та, что была рассчитана по модели БГП (рис. 3, табл. 4). В то же время по археомагнитным данным (ArcheoInt, GEOMAGIA50) средняя величина VADM несколько превышает модельную. Однако наиболее существенной представляется разница в дисперсиях VADM – по всем четырем базам данных она заметно выше, чем рассчитанная по модели БГП. Отметим, что все эти функции распределения далеки от нормального распределения.

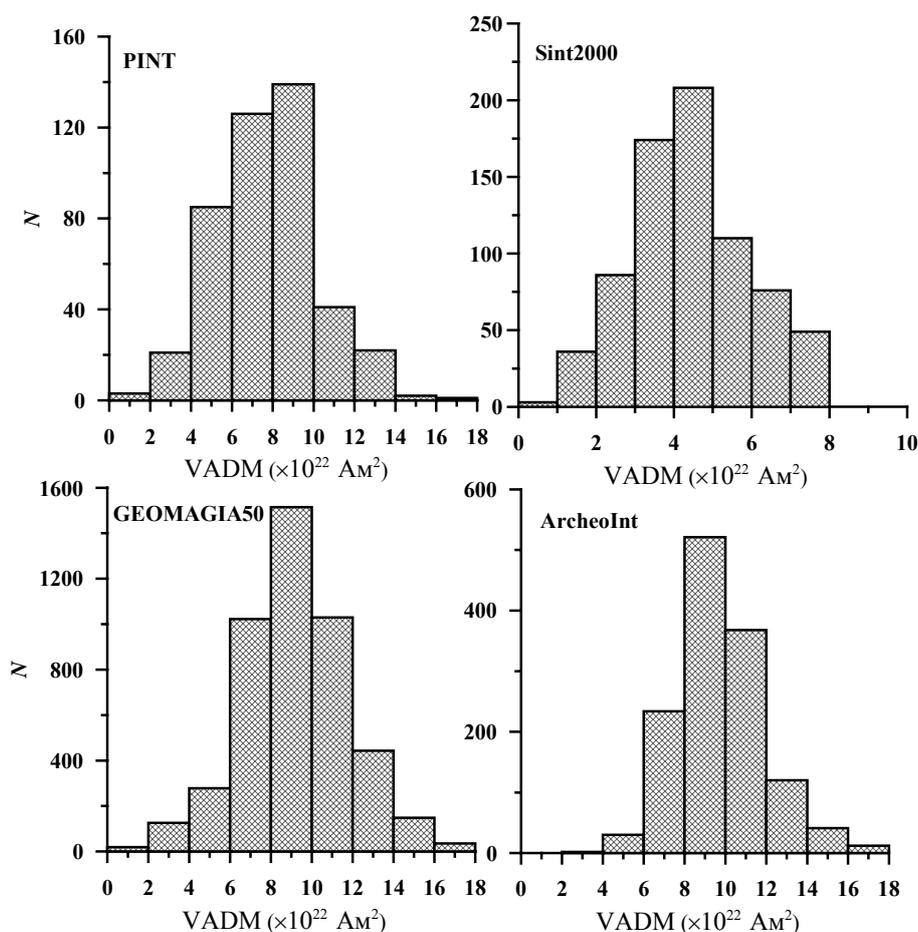


Рис. 4. Гистограммы величин VADM, полученных в результате обработки баз данных PINT (для эпохи Брюнеса), ArcheoInt, GEOMAGIA50, Sint-2000. Средние значения VADM и дисперсии приведены в табл. 4

Имея в виду отмеченное выше неплохое согласие численных и эмпирических данных по статистике распределения положений VGP, такое расхождение дисперсий интенсивности VADM, рассчитанных по модели БГП и полученных экспериментально, требует объяснений. Наиболее вероятной причиной этого несоответствия, по нашему мнению, является вклад в дисперсию экспериментальных ошибок измерения величины VADM. Предполагая, что такая ошибка имеет гауссовское распределение с нулевым средним, можно при численной реализации схемы БГП легко внести соответствующие поправки в кривые изменения VADM со временем. Результат введения такой поправки на размах колебаний интенсивности VADM продемонстрирован на рис. 5, где проведено сравнение двух реализаций кривой изменения VADM(t): чёрной линией представлен график зависимости VADM(t) без учёта ошибки измерения, а серой линией – с учётом возможной ошибки определения величины VADM. Как и следовало ожидать, введение ошибки измерения значительно увеличивает разброс возможных значений VADM на одном и том же интервале времени.

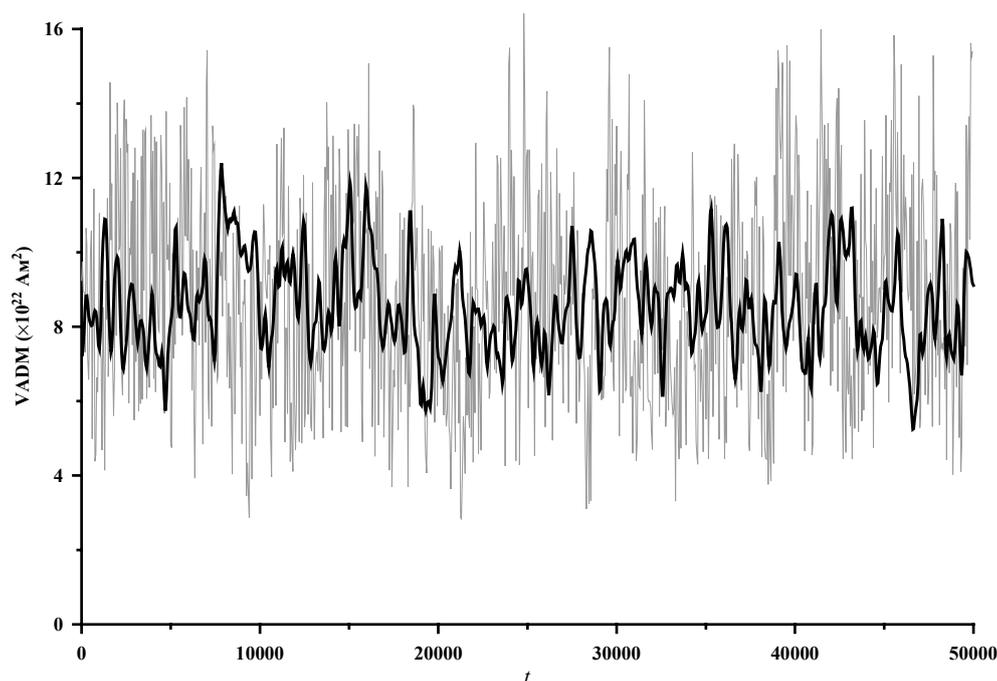


Рис. 5. Чёрная линия – график зависимости $VADM(t)$ для точки с координатами $\vartheta = -30^\circ$, $\varphi = 160^\circ$, рассчитанный с помощью параметров, указанных в табл. 1 и 2. Средняя $VADM = 8.61$, $\sigma_{VADM} = 1.15$. Серая линия – то же, что и на чёрной линии, но с учётом возможной ошибки определения величины $VADM$. В этом случае среднее $VADM = 8.66$, $\sigma_{VADM} = 2.77$. Предполагается, что ошибка распределена по Гауссу с нулевым средним и $\sigma_{VADM} = 0.48 VADM$

Что касается абсолютных определений палеонапряжённости по изверженным породам по методике Телье, то декларированная авторами работ по определению палеонапряжённости ошибка определения по отобранным 440 моментам времени не превышает 15% от величины измеренной $VADM$, но оказалось, что введение такой дополнительной ошибки в расчёт по схеме БГП не слишком сближает конечный результат с эмпирическими данными. По-видимому, реальная ошибка определения значительно превышает его формальную ошибку ввиду невозможности учесть множество дополнительных факторов (многодоменность ферримагнитных зёрен-носителей остаточной намагниченности, химические и структурные изменения, происходящие как во время жизни породы, так и при лабораторных измерениях и т. д. [27–29]), влияющих на результат определения по методу Телье даже и для относительно молодых пород. Как показал расчёт, лучшее согласие с экспериментом достигается при введении дополнительной ошибки с $\sigma_{VADM} = 0.41 VADM$. Для данных по Sint-2000 декларированная ошибка определения составляет в среднем 30% [20]. В этом случае удовлетворительное согласие с экспериментом было получено нами при введении дополнительной ошибки с $\sigma_{VADM} = 0.32 VADM$ в соответствии с декларированной ошибкой определения.

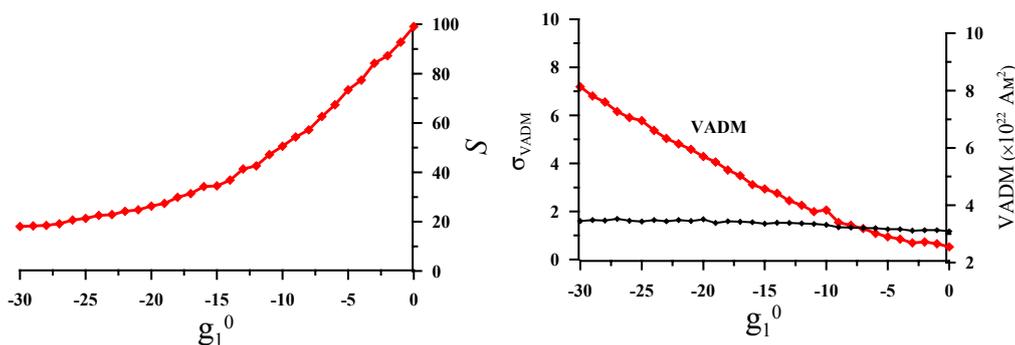


Рис. 6. Зависимость дисперсии VGP и величины и дисперсии VADM от величины дипольной составляющей g_1^0 , рассчитанная по модели БГП

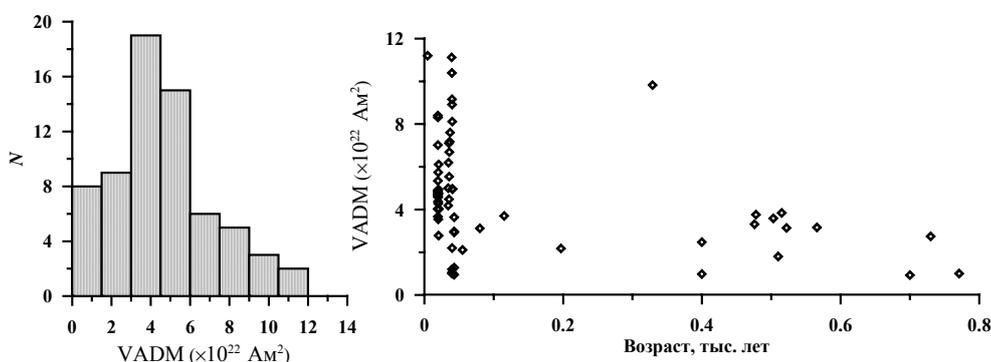


Рис. 7. *a*) гистограмма величин VADM, база данных PINT, эпоха Брюнеса, переходная полярность; *б*) распределение по возрасту в эпохе Брюнеса величин VADM (для данных с переходной полярностью)

На рис. 6 представлены результаты расчета зависимости величины и дисперсии VADM и дисперсии VGP от величины дипольной составляющей g_1^0 . VADM рассчитывалась по модели БГП с $\tau = 1000$ лет для случайного местоположения в интервале 0–780 тыс. лет. С уменьшением (по абсолютной величине) дипольной составляющей g_1^0 , а значит, с ростом вклада недипольных компонент уменьшается величина VADM и растёт дисперсия VGP, дисперсия VADM от величины дипольной составляющей g_1^0 практически не зависит. Для сравнения на рис. 7, *a* показана гистограмма величин VADM (67 определений), полученных из МБД PINT по палеонапряжённости, отобраны только те данные для эпохи Брюнеса, для которых авторами работ по определению палеонапряжённости объявлена переходная полярность. Среднее VADM в этом случае почти в два раза ниже среднего значения VADM в эпохе Брюнеса 4.6 против 7.7 (табл. 4) при неизменной дисперсии $\sigma_{\text{VADM}} = 2.5$.

Проведено численное моделирование вековых вариаций по схеме БГП при учёте 5 гармоник и параметров, указанных в табл. 1 и 2, для временного интервала 0–10 млн лет для точки с координатами $\vartheta = 58^\circ$, $\varphi = 38^\circ$. Результаты расчетов по схеме БГП показали, что на 10 млн лет наблюдается лишь несколько случаев снижения наклонения ниже 20° и величины VDM до 0.5 от современного

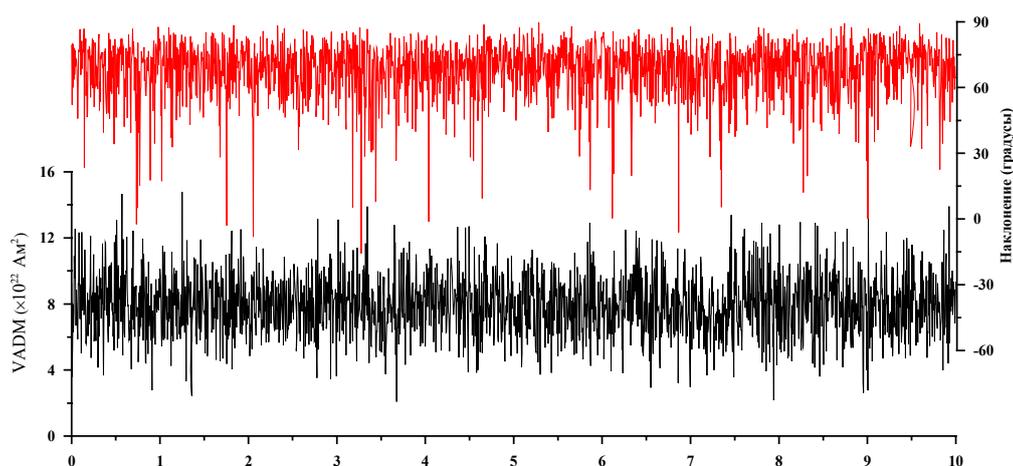


Рис. 8. Зависимости величины $VADM(t)$ и наклонения $Incl(t)$, построенные по результатам численного моделирования за 10 млн лет

значения, в то время как в реальности частота экскурсов в эпохе Брюнеса составляет примерно 1 в 100 тыс. лет. С увеличением вдвое дисперсии для дипольных компонент σ_1^0 и σ_1^1 (табл. 1) и уменьшением вдвое времени их автокорреляции, по результатам численного моделирования наблюдается 6–7 случаев снижения наклонения ниже 20° . При этом величины VDM падают до 0.5 от современного значения (рис. 8). Такое значительное изменение параметров модели привело к росту частоты инверсий на порядок величины, но, тем не менее, она остаётся в несколько раз ниже наблюдаемой реально частоты экскурсов. Причиной такого расхождения между численными и эмпирическими данными может быть либо неправильное отражение моделью БГП поведения поля на больших отрезках времени, и, следовательно, модель необходимо корректировать, либо экскурсы не являются частью вековых вариаций, а определяются каким-то другим процессом, происходящим при генерации геомагнитного поля.

Заключение

Статистические характеристики распределения положений виртуального геомагнитного полюса, полученные при анализе данных, представленных в современных мировых базах данных по палеонапряжённости, согласуются с результатами численного моделирования вековых вариаций геомагнитного поля по схеме БГП.

Дисперсия величины виртуального геомагнитного момента, рассчитанная по этим данным, оказалась заметно выше той, которую предсказывает модель БГП. Это расхождение устраняется лишь в предположении наличия, кроме обычно декларируемых, значительных неучтённых экспериментальных ошибок при определении палеонапряжённости по методике Телье.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 12-05-00288, 14-07-00962).

Литература

1. *Constable C.G., Parker R.L.* Statistics of the geomagnetic secular variation for the past 5 m.y. // *J. Geophys. Res. Solid Earth.* – 1988. – V. 93, No B10. – P. 11569–11581.
2. *Хохлов А.* Моделирование вековых геомагнитных вариаций. Принципы и реализация // *Геофизические исслед.* – 2011. – Т. 13, № 2. – С. 50–61.
3. *Tanaka H., Kono M., Uchimura H.* Some global features of palaeointensity in geological time // *Geophys. J. Int.* – 1995. – V. 120, No 1. – P. 97–102. – doi: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb05913.x.
4. *Perrin M., Shcherbakov V.P.* Paleointensity of the Earth's magnetic field for the past 400 Ma: Evidence for a Dipole structure during the Mesozoic Low // *J. Geomagn. Geoelectr.* – 1997. – V. 49, No 4. – P. 601–614.
5. *Perrin M., Schnepf E., Shcherbakov V.P.* Paleointensity Database Updated // *Eos Trans. AGU.* – 1998. – V. 79, No 19. – P. 198.
6. *Perrin M., Schnepf E.* IAGA paleointensity database: distribution and quality of the data set // *Phys. Earth Planet. Int.* – 2004. – V. 147, No 2–3. – P. 255–267.
7. *Щербаков В.П., Сычева Н.К.* Мировая база данных (МБД) по палеонапряженности: история создания и инструкция к пользованию // *Материалы семинара «Палеомагнетизм и магнетизм горных пород»*, Борок, 22–25 окт. 2009 г. – Ярославль: ООО «Сервисный центр», 2009. – С. 252–257.
8. *Thellier E., Thellier O.* Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique // *Ann. Geophys.* – 1959. – Т. 15, F. 3. – P. 285–376.
9. *Coe R.S.* The determination of paleo-intensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanisms which could cause non-ideal behavior in Thellier's method // *J. Geomagn. Geoelectr.* – 1967. – V. 19, No 3. – P. 157–179.
10. *Selkin P.A., Tauxe L.* Long-term variations in palaeointensity // *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.* – 2000. – V. 358. – P. 1065–1088. – doi: 10.1098/rsta.2000.0574.
11. *Щербакова В.В., Щербаков В.П., Водовозов В.В., Сычева Н.К.* Палеонапряженность на границе пермь – триас и в поздней перми // *Физика Земли.* – 2005. – № 11. – С. 79–94.
12. *Щербакова В.В., Жидков Г.В., Щербаков В.П.* О повторном определении палеонапряженности в мелу по коллекции А.С. Большакова и Г.М. Солодовникова // *Физика Земли.* – 2008. – № 10. – С. 69–74.
13. *Genevey A., Gallet Y., Constable C.G., Korte M., Hulot G.* ArcheoInt: An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2008. – V. 9, No 4. – Art. Q04038, P. 1–23. – doi: 10.1029/2007GC001881.
14. *Korte M., Constable C.G.* Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2005. – V. 6, No 1. – Art. Q02H16, P. 1–18. – doi: 10.1029/2004GC000801.
15. *Donadini F., Korhonen K., Riisager P., Pesonen L.* Database for Holocene geomagnetic intensity information // *Eos Trans. AGU.* – 2006. – V. 87, No 14. – P. 137.
16. *Korhonen K., Donadini F., Riisager P., Pesonen L.* GEOMAGIA50: An archeointensity database with PHP and MySQL // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2008. – V. 9, No 4. – Art. Q04029, P. 1–14. – doi: 10.1029/2007GC001893.
17. *Donadini F., Korte M., Constable C.G.* Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. New data sets for global modeling // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2009. – V. 10, No 6. – Art. Q06007, P. 1–28. – doi: 10.1029/2008GC002295.

18. Korte M., Donadini F., Constable C.G. Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models // *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2009. – V. 10, No 6. – Art. Q06008, P. 1–24. – doi: 10.1029/2008GC002297.
19. Korte M., Constable C.G., Donadini F., Holme R. Reconstructing the Holocene geomagnetic field // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2011. – V. 312, No 3–4. – P. 497–505. – doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.031
20. Valet J.-P., Meynadier L., Guyodo Y. Geomagnetic dipole strength and reversal rate over the past two million years // *Nature.* – 2005. – V. 435. – P. 802–805. – doi: 10.1038/nature03674.
21. Quideller X., Courtillot V. On low-degree spherical harmonic models of paleosecular variation // *Phys. Earth Planet. Int.* – 1996. – V. 95, No 1–2. – P. 55–77.
22. Khokhlov A., Hulot G., Bouligand C. Testing statistical palaeomagnetic field models against directional data affected by measurement errors // *Geophys. J. Int.* – 2006. – V. 167, No 2. – P. 635–648. – doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03133.x.
23. Khokhlov A., Hulot G. Probability uniformization and application to statistical palaeomagnetic field models and directional data // *Geophys. J. Int.* – 2013. – V. 193, No 1. – P. 110–121. – doi: 10.1093/gji/ggs118.
24. Peck J.A., King J.W., Colman S.M., Kravchinsky V.A. An 84-kyr paleomagnetic record from the sediments of Lake Baikal, Siberia // *J. Geophys. Res.* – 1996. – V. 101, No B5. – P. 11365–11385.
25. Lund S.P., Liddicoat J.C., Lajoie K.R., Henyey T.L., Robinson S.W. Paleomagnetic evidence for long-term (10^4 year) memory and periodic behavior in the Earth's core dynamo process // *Geophys. Res. Lett.* – 1988. – V. 15, No 10. – P. 1101–1104.
26. Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle.* – San Diego, Calif.: Acad. Press, 1996. – 531 p.
27. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers.* – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1997. – 573 p.
28. Valet J.-P. Time variations in geomagnetic intensity // *Rev. Geophys.* – 2003. – V. 41, No 1. – Art. 1004, P. 4-1–4-43. – doi: 10.1029/2001rg000104.
29. Shcherbakova V.V., Perrin M., Shcherbakov V.P., Pavlov V.E., Ayyaz'yan A., Zhidkov G.V. Rock magnetic and paleointensity results from Mesozoic baked contacts of Armenia // *Earth Planet. Space.* – 2009. – V. 61. – P. 23–39.

Поступила в редакцию
20.01.14

Сычева Наталия Константиновна – кандидат физико-математических наук, заместитель директора, Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия.

E-mail: sycheva@borok.yar.ru

Щербаков Валерий Прохорович – доктор физико-технических наук, заведующий лабораторией древнего геомагнитного поля, Геофизическая обсерватория «Борок» ИФЗ РАН, пос. Борок, Ярославская обл., Россия.

E-mail: shcherb@borok.yar.ru

Хохлов Андрей Владимирович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия.

E-mail: fbmotion@yandex.ru

* * *

**RESULTS OF JOINT STATISTICAL ANALYSES
OF MODERN WORLD DATABASES ON PALEOMAGNETISM
AND PALEOINTENSITY
BY THE SCHEME OF GIANT GAUSSIAN PROCESS**

N.K. Sycheva, V.P. Shcherbakov, A.V. Khokhlov

Abstract

A review of modern world databases on paleomagnetism and paleointensity is presented. The analysis of synthetic and empirical data on the positions of the virtual geomagnetic pole and the paleointensity of the geomagnetic dipole is carried out. Numerical modeling of the secular variations of the geomagnetic field is done following the giant Gaussian process (GGP) model. The results are compared with the data presented in the modern world databases. The position dispersions of the virtual geomagnetic pole (VGP), calculated for both synthetic and empiric data (Brunhes epoch, igneous rocks), appeared to be close to each other. This confirms the validity of the theoretical model. For all the databases, the dispersions of the virtual axial geomagnetic dipole (VADM) occurred to be noticeably higher than those calculated by the BGP model. The most probable cause of this discrepancy is a contribution of the experimental errors in VADM determination which were not detected during the Thellier experiments.

Keywords: paleomagnetism, paleointensity, giant Gaussian process, model of secular variations, databases.

References

1. Constable C.G., Parker R.L. Statistics of the geomagnetic secular variation for the past 5 m.y. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 1988, vol. 93, no. B10, pp. 11569–11581.
2. Khokhlov A. Modeling of geomagnetic secular variations: Principles and implementation. *Geofiz. Issled.*, 2011, vol. 13, no. 2, pp. 50–61. (In Russian)
3. Tanaka H., Kono M., Uchimura H. Some global features of palaeointensity in geological time. *Geophys. J. Int.*, 1995, vol. 120, no. 1, pp. 97–102. doi: 10.1111/j.1365-246X.1995.tb05913.x.
4. Perrin M., Shcherbakov V.P. Paleointensity of the Earth's magnetic field for the past 400 Ma: Evidence for a Dipole structure during the Mesozoic Low. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1997, vol. 49, no. 4, pp. 601–614.
5. Perrin M., Schnepf E., Shcherbakov V.P. Paleointensity Database Updated. *Eos Trans. AGU*, 1998, vol. 79, no. 19, p. 198.
6. Perrin M., Schnepf E. IAGA paleointensity database: distribution and quality of the data set. *Phys. Earth Planet. Int.*, 2004, vol. 147, no. 2–3, pp. 255–267.
7. Shcherbakov V.P., Sycheva N.K. World Database on Paleointensity: Origin and User Guide. *Materialy seminara "Paleomagnetizm i magnetizm gornykh porod", Borok, 22–25 okt. 2009 g.* [Proc. Seminar "Paleomagnetism and Rock Magnetism", Borok, October 22–25, 2009]. Yaroslavl, Servisnyi tsentr, 2009, pp. 252–257. (In Russian)
8. Thellier E., Thellier O. Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.*, 1959, vol. 15, no. 3, pp. 285–376.
9. Coe R.S. The determination of paleo-intensities of the Earth's magnetic field with emphasis on mechanisms which could cause non-ideal behavior in Thellier's method. *J. Geomagn. Geoelectr.*, 1967, vol. 19, no. 3, pp. 157–179.
10. Selkin P.A., Tauxe L. Long-term variations in palaeointensity. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2000, vol. 358, pp. 1065–1088. doi: 10.1098/rsta.2000.0574.
11. Shcherbakova V.V., Shcherbakov V.P., Vodovozov V.V., Sycheva N.K. Paleointensity at the Permian-Triassic boundary and in the Late Permian. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2005, vol. 41, no. 11, pp. 931–944.
12. Shcherbakova V.V., Zhidkov G.V., Shcherbakov V.P. Revised determination of the paleointensity in the Cretaceous from the collection of A.S. Bolshakov and G.M. Solodovnikov. *Izv. Phys. Solid Earth*, 2008, vol. 44, no. 10, pp. 816–821. doi: 10.1134/s1069351308100091.

13. Genevey A., Gallet Y., Constable C.G., Korte M., Hulot G. ArcheoInt: An upgraded compilation of geomagnetic field intensity data for the past ten millennia and its application to the recovery of the past dipole moment. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, vol. 9, no. 4, Art. Q04038, pp. 1–23. doi: 10.1029/2007GC001881.
14. Korte M., Constable C.G. Continuous geomagnetic field models for the past 7 millennia: 2. CALS7K. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2005, vol. 6, no. 1, Art. Q02H16, pp. 1–18. doi: 10.1029/2004GC000801.
15. Donadini F., Korhonen K., Riisager P., Pesonen L. Database for Holocene geomagnetic intensity information. *Eos Trans. AGU*, 2006, vol. 87, no. 14, p. 137.
16. Korhonen K., Donadini F., Riisager P., Pesonen L. GEOMAGIA50: An archeointensity database with PHP and MySQL. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, vol. 9, no. 4, Art. Q04029, pp. 1–14. doi: 10.1029/2007GC001893.
17. Donadini F., Korte M., Constable C.G. Geomagnetic field for 0–3 ka: 1. New data sets for global modelling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009, vol. 10, no. 6, Art. Q06007, pp. 1–28. doi: 10.1029/2008GC002295.
18. Korte M., Donadini F., Constable C.G. Geomagnetic field for 0–3 ka: 2. A new series of time-varying global models. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009, vol. 10, no. 6, Art. Q06008, pp. 1–24. doi: 10.1029/2008GC002297.
19. Korte M., Constable C.G., Donadini F., Holme R. Reconstructing the Holocene geomagnetic field. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, vol. 312, no. 3–4, pp. 497–505. doi: 10.1016/j.epsl.2011.10.031
20. Valet J.-P., Meynadier L., Guyodo Y. Geomagnetic dipole strength and reversal rate over the past two million years. *Nature*, 2005, vol. 435, pp. 802–805. doi: 10.1038/nature03674.
21. Quideller X., Courtillot V. On low-degree spherical harmonic models of paleosecular variation. *Phys. Earth Planet. Int.*, 1996, vol. 95, no. 1–2, pp. 55–77.
22. Khokhlov A., Hulot G., Bouligand C. Testing statistical palaeomagnetic field models against directional data affected by measurement errors. *Geophys. J. Int.*, 2006, vol. 167, no. 2, pp. 635–648. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03133.x.
23. Khokhlov A., Hulot G. Probability uniformization and application to statistical palaeomagnetic field models and directional data. *Geophys. J. Int.*, 2013, vol. 193, no. 1, pp. 110–121. doi: 10.1093/gji/ggs118.
24. Peck J.A., King J.W., Colman S.M., Kravchinsky V.A. An 84-kyr paleomagnetic record from the sediments of Lake Baikal, Siberia. *J. Geophys. Res.*, 1996, vol. 101, no. B5, pp. 11365–11385.
25. Lund S.P., Liddicoat J.C., Lajoie K.R., Henyey T.L., Robinson S.W. Paleomagnetic evidence for long-term (10^4 year) memory and periodic behavior in the Earth's core dynamo process. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, vol. 15, no. 10, pp. 1101–1104.
26. Merrill R.T., McElhinny M.W., McFadden P.L. *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. San Diego, Calif., Acad. Press, 1996. 531 p.
27. Dunlop D.J., Ozdemir O. *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1997. 573 p.
28. Valet J.-P. Time variations in geomagnetic intensity. *Rev. Geophys.*, 2003, vol. 41, no. 1, Art. 1004, pp. 4-1–4-43. doi: 10.1029/2001rg000104.
29. Shcherbakova V.V., Perrin M., Shcherbakov V.P., Pavlov V.E., Ayvaz'yan A., Zhidkov G.V. Rock magnetic and paleointensity results from Mesozoic baked contacts of Armenia. *Earth Planet. Space*, 2009, vol. 61, pp. 23–39.

Received
January 20, 2014

Sycheva Nataliya Konstantinovna – PhD in Physics and Mathematics, Deputy Director, Borok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl Region, Russia.

E-mail: sycheva@borok.yar.ru

Shcherbakov Valerii Prokhorovich – Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Paleogeomagnetic Laboratory, Borok Geophysical Observatory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl Region, Russia.

E-mail: *shcherb@borok.yar.ru*

Khokhlov Andrei Vladimirovich – Doctor of Physics and Mathematics, Chief Research Fellow, International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: *fbmotion@yandex.ru*