

ПОВЕДЕНИЕ ГЛАВНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ ПОСЛЕ БУРЬ

Кусонский О. А., Бебнев А. С. – Институт геофизики УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация. В статье рассмотрены особенности вариации геомагнитного поля, наблюдаемые после магнитных бурь. По мировым обсерваторским данным установлено, что после многих магнитных бурь отмечается скачкообразное изменение величины и направления вариации магнитного поля. Выполненные расчеты поля методом сферического гармонического анализа и построенные карты наблюденных и рассчитанных величин показывают, что источники изменения поля принадлежат главному полю Земли. Это может свидетельствовать в пользу того, что поведение геомагнитного поля, его вековые вариации в большой степени зависят от солнечной деятельности.

THE BEHAVIOUR OF THE EARTH MAIN MAGNETIC FIELD AFTER STORMS

Kysonskiy O.A., Bebnev A.S. – *Institute of Geophysics, UB of RAS, Yekaterinburg*

Abstract. The peculiarities of geomagnetic field variation, observed after storms, are considered in the paper. According to world observatory data it was established that after many magnetic storms jump-like change of the value and direction of magnetic field variation was noted. The fulfilled calculations of the field with the method of spherical harmonic analysis and compiled maps of observed and calculated values show that the sources of field change are in the Earth main field. It may testify that geomagnetic field behavior, its secular variations mainly depend on solar activity.

Введение

Происхождение главного магнитного поля Земли и его вариаций по современным представлениям связано с вихревыми движениями вещества в жидком электропроводящем ядре и неоднородностями на границе ядро–мантия. Вековые вариации главного поля могут быть вызваны рядом физических причин, каждая из которых обуславливает определенный вид векового хода геомагнитного поля. Часть из них, имеющая характерные времена около 60 лет и амплитуды до 50–80 нТл в год, может быть вызвана региональными процессами, протекающими в недрах Земли на границе «ядро–мантия». Эти процессы неподвижны относительно мантии и приводят к возникновению и разрушению особенностей поля величиной до $2 \div 3$ тыс. нТл на поверхности Земли. На вековые вариации влияют также неоднородности глубинного строения, которые образуются в результате перемещения и распада континентов. Завихрения токов, огибающих эти неоднородности, создают фокусы вековых вариаций геомагнитного поля. Кроме того, на вековых вариациях поля могут сказываться изменения намагниченности земной коры под действием деформационных процессов в горных породах, в которых содержатся

ферромагнитные минералы. Так, вековые вариации с периодами, не превышающими первые десятки лет, могут создаваться относительно небольшими перемещениями блоков тектонической оболочки по разломам, нарушающим нормальное положение магнитной оболочки Земли [1–6].

Вековой ход геомагнитного поля на поверхности Земли в различных местах по данным обсерваторских наблюдений имеет различную величину. Поле изменяется от 0 нТл/год до максимальных величин – 150 нТл/год в Антарктике [7]. По наблюдениям обсерватории «Арти» вековой ход модуля МПЗ на Урале за 2001 г. составил 49 нТл/год, за 2002 – 52 нТл/год, за 2003 – 53 нТл/год. В 2004 г. началось резкое уменьшение, и он составил уже 40 нТл/год, за 2005 – 36 нТл/год, за 2006 – 32 нТл/год.

Теория, объясняющая образование источников главного геомагнитного поля, его вековых вариаций, в основном опирается на механизм внутриземного их происхождения [8]. Внешние факторы, влияющие на величину и направление вектора намагниченности источников, например, такие как солнечные процессы, принимаются во внимание в меньшей степени. Данные мировой сети обсерваторий подтверждают существование связи годовой вариации с

солнечной активностью. Так, в годы максимума солнечной активности амплитуда годовой вариации вдвое больше, чем в годы минимума [9].

На Урале вековые изменения поля исследуются с 1836 г., со времени образования обсерватории «Екатеринбург».

Впервые выявлена корреляция аномальных скачкообразных изменений поля и магнитных бурь одновременно по всем обсерваториям мира. Величина этих изменений поля не исчезает с прекращением бури, а сохраняется в последующий период. Эта связь, приводящая к изменению поля Земли, может свидетельствовать о существовании воздействия магнитных бурь на источники геомагнитного поля, приводящие к изменению их магнитного момента и направления намагниченности [10].

1. Методика исследования поведения геомагнитного поля после магнитных бурь

Рассмотрим данные по геомагнитному полю за 2004 г. по наблюдениям на обсерватории «Арти». В течение года было зарегистрировано 16 магнитных бурь, которые по интенсивности оценены как умеренные, большие и очень большие. Зарегистрировано также 24 малые магнитные бури. Для сравнения укажем, что в 2003 году эти цифры составляли соответственно 30 и 23. Уменьшение возмущенности поля по сравнению с предыдущим годом связано с наблюдающимся спадом 23 цикла солнечной активности.

В табл. 1 приведены характеристики пяти наиболее сильных магнитных бурь.

Обозначения в табл. 1: D – склонение вектора геомагнитного поля, H – горизонтальная компонента вектора, Z – вертикальная компонента.

Целая серия очень больших магнитных бурь в 2004 г. наблюдалась с 22 июля по 31 августа. Самая большая буря зарегистрирована в период с 7 по 12 ноября. Это одна из наиболее интенсивных бурь, наблюдавшихся за последние 15 лет. На графиках медианных суточных величин компонент поля эти дни выделяются наибольшими амплитудами (рис. 1). Возмущения поля осложняют график суточных величин поля, делая его изрезанным в большей или меньшей степени. На графиках за 2004 г. поведение поля подчиняется вполне определенным закономерностям (рис. 1).

Для примера взяты данные всех компонент по обсерваториям «Арти» ARS (56.433°N, 58.567°E), и Z-компонента для станций «Иркутск» (52.167°N, 104.450°E), «Новосибирск» NVS (22.900°N, 55.033°E, Россия) и FUR (11.280°N, 48.170°E, Германия) (рис.1, 2).

В отдельные периоды поле изменяется более или менее плавно, в другие – скачкообразно, ступенчато. Так, с начала года до 22 июля отмечено плавное возрастание компонент и модуля поля. Для обсерватории ARS наблюдается возрастание компоненты Z на 15–20 нТл, H – на 10 нТл, модуль вектора T увеличился примерно на 20 нТл, а склонение D несколько уменьшилось, примерно на 10–20 мин. В этот период произошло 8 магнитных бурь, причем только одна из них большая

Таблица 1. Сильнейшие магнитные бури 2004 года по данным обсерватории «Арти»

Начало бури		Конец бури		Продолж. бури, час	Амплитуда		
Дата	Время, ч:м	Дата	Время, ч:м		D , мин.	H , нТл	Z , нТл
22.01	01:36	28.01	24:00	166	60,8	167,6	258,3
22.07	10:36	23.07	21:00	34	33,8	226,7	182,2
26.07	22:51	29.07	10:00	59	98,3	718,1	650,0
29.08	10:04	31.08	24:00	62	52,1	153,8	258,9
07.11	10:52	12.11	23:00	132	140,5	931,2	1267,0

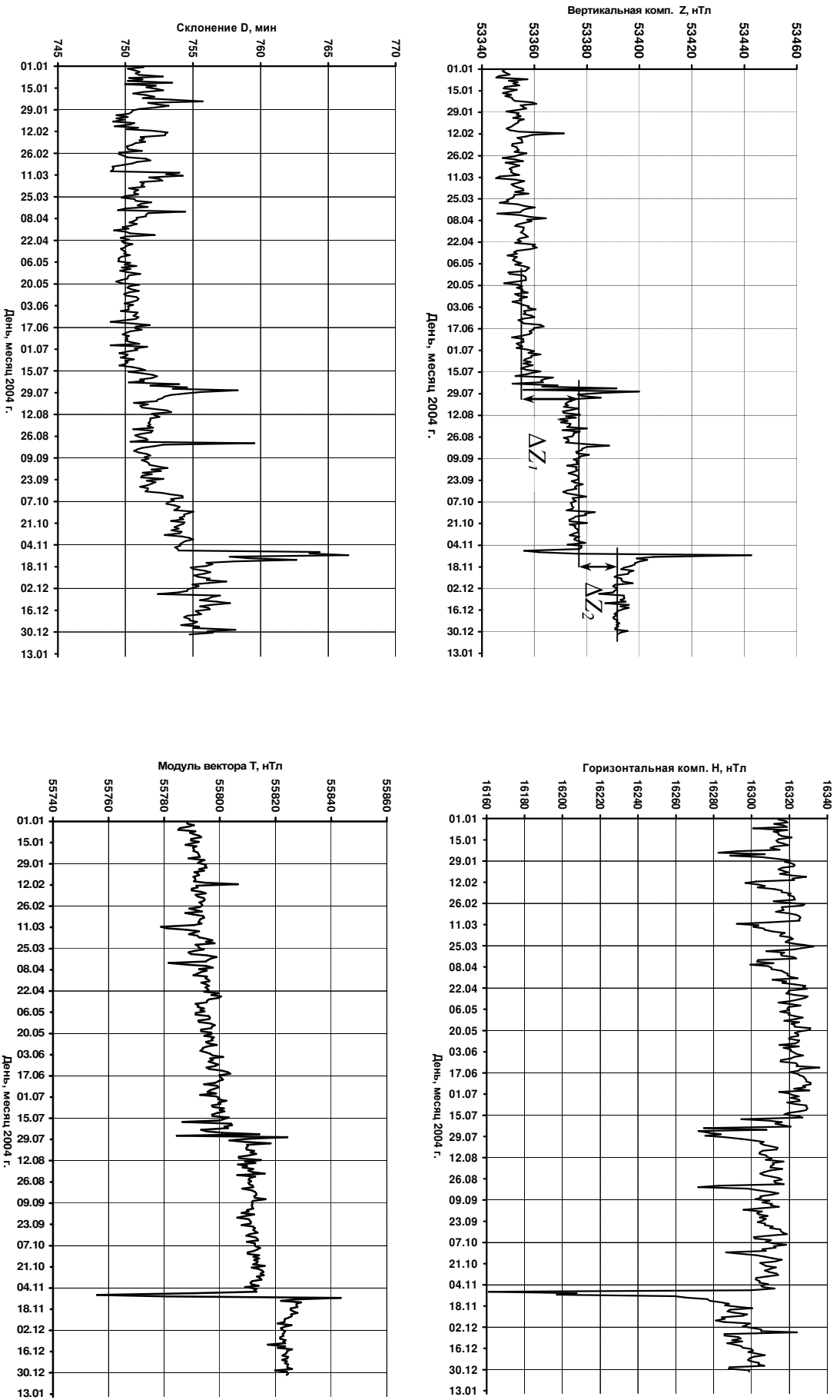


Рис. 1. Графики компонент Z, H, D и модуля вектора геомагнитного поля T, зарегистрированные на обсерватории «Аркти» в 2004 г.

(с 22 по 28 января), и зарегистрировано 15 малых возмущений поля длительностью от 54 до 166 часов.

С 22 июля отмечается отчетливое скачкообразное изменение (приращение) всех компонент поля. Для обсерватории ARS Z -компонента возросла в течение нескольких дней на 15–20 нТл, H – уменьшилась примерно на 15 нТл (напомним, что до этого оно возрастало), T – возрос на 7–8 нТл, D – возросло на 2 мин. (причем до этого склонение уменьшалось). Для обсерватории NVS, например, в Z -компоненте наблюдается скачок +18 нТл, для FUR – +19 нТл.

Скачкообразное изменение поля (обозначим величину приращения в компонентах поля Z , H , D соответственно величинами ΔZ_1 , ΔH_1 , ΔD_1 , где 1 – порядковый номер скачка) приурочено к серии сильных магнитных бурь, зарегистрированных с 22 июля по 31 августа (рис. 1). Произшедшие изменения поля сохранялись в дальнейшем вплоть до 7 ноября, когда было отмечено второе аналогичное скачкообразное изменение поля. В этот день началась очень сильная буря. Изменения поля в результате второго скачка составили для обсерватории ARS: $\Delta Z_2 = +15$ нТл, $\Delta H_2 = -10$ нТл, модуля вектора $\Delta T_2 = +10$ нТл и $\Delta D_2 = +1$ мин. Аналогичные скачки поля, приуроченные к этим бурям, наблюдаются и на других обсерваториях. Эти изменения также носят необратимый характер и сохраняются в последующий период после затухания бури и релаксации поля.

Величина приращений и векового хода за 2004 г. по обсерватории «Арти», определенного по стандартной методике (среднегодовая величина компонент поля по всем дням за 2004 г. минус среднегодовая величина за 2003 г.) соизмеримы. Так, вековой ход составил по компонентам $D = +1,7$ мин., $H = +12$ нТл, $Z = +44$ нТл, $T = +40$ нТл. Два скачкообразных приращения поля в течение года, приуроченные к магнитным бурям, составили $\Delta D = +3$ мин., $\Delta H = -25$ нТл (уменьшение компоненты), $\Delta Z = +(30-35)$ нТл, по модулю $\Delta T = +18$ нТл.

Таким образом, можно считать, что в 2004 г. существенное влияние на величи-

ну векового хода оказывали магнитные бури.

2. Результаты исследований

Аналогичные изменения поля, приуроченные к периодам магнитных бурь, наблюдаются и по другим обсерваториям. По 115 магнитным станциям мировой сети получены данные о величинах скачкообразного изменения поля, наблюдаемых после магнитных бурь 22 июля – 31 августа 2004 г., и построены карты параметров ΔD , ΔH , ΔX , ΔY , ΔZ (рис. 2а). Установлено, что величины ΔH и ΔZ изменяются по поверхности Земли и зависят в основном от широты места расположения точки наблюдения. Параметр ΔH имеет величины от – 32 до 0 нТл (рис 2в). Вблизи магнитных полюсов наблюдаются нулевые изолинии параметра, а по экватору Земли отмечаются максимальные отрицательные значения, равные $-28 \div -32$ нТл. Величина параметра ΔZ изменяется от –20 нТл на Южном полюсе Земли до +18 нТл на Северном полюсе (рис 3а). Нулевая изолиния проходит вблизи экватора Земли. На континентах изолинии формируют экстремумы, указывающие на влияние материковых магнитных источников.

Параметр ΔD меняется в диапазоне от –0,02 (Антарктида) до +0,03° (Евразия). На материках изолинии параметра образуют положительные и отрицательные изометричные экстремумы величиной от –0,03 до +0,03°.

Величина (модуль) скачков поля по обсерваториям на поверхности Земли находится в пределах от 12 до 45 нТл. Большинство обсерваторий показали величину от 20 до 25 нТл. Геомагнитное поле после магнитных бурь 22 июля – 31 августа 2004 г. стало больше на указанную величину.

Математическая модель эффекта изменения поля после бури

Моделирование заключалось в расчете компонент поля по формулам сферического гармонического анализа и сравнении карт измеренных величин приращения поля и рассчитанных теоретически. Если пренебречь внешними источниками (а скачки

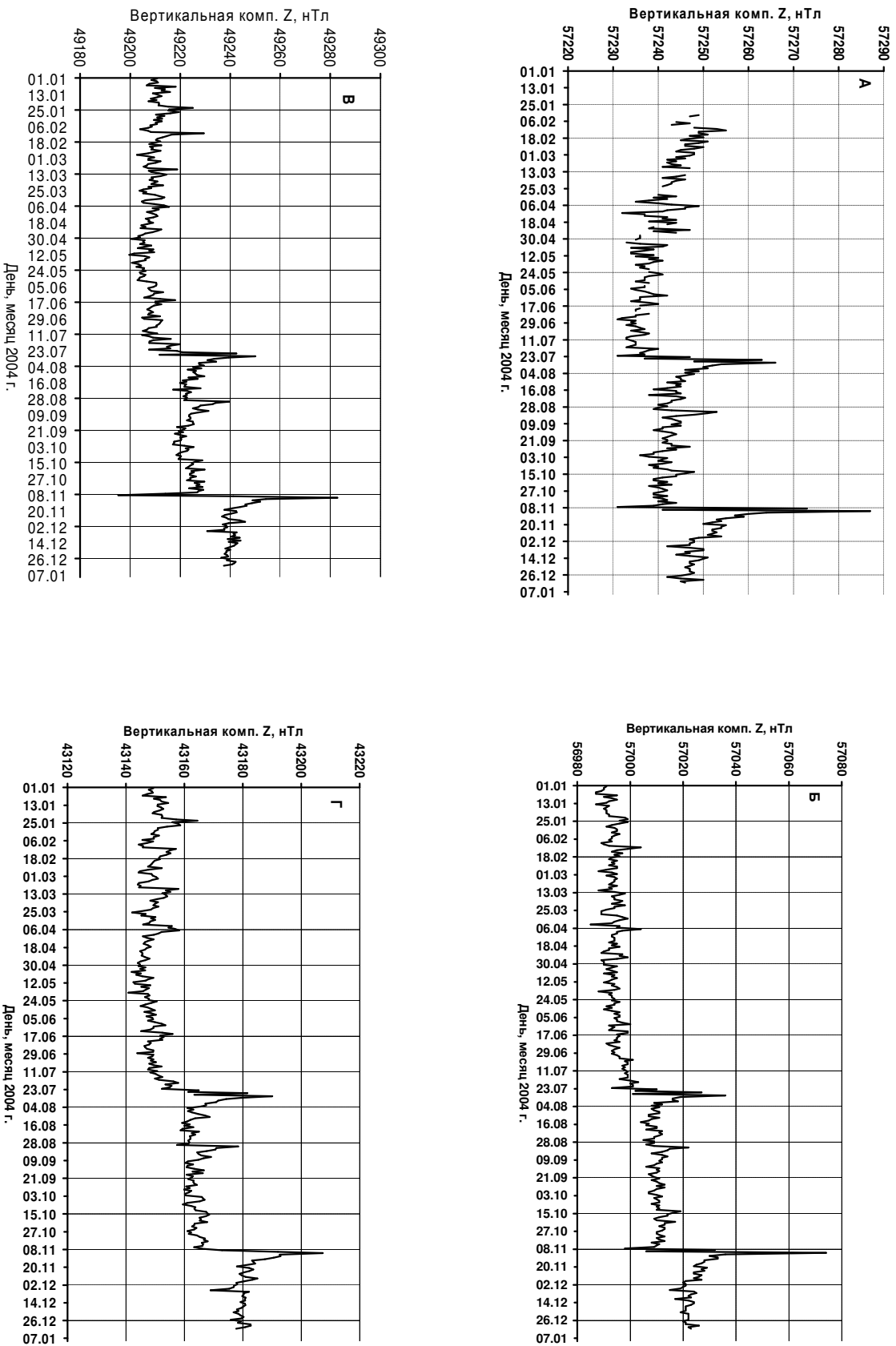


Рис. 2. Графики среднесуточных значений Z-компоненты по обсерваториям: А – «Иркутск», Б – «Новосибирск», В – «Москва», Г – FUR за 2004 г.

поля определялись по значениям поля для периодов до и после бури), то компоненты геомагнитного поля на поверхности Земли можно вычислить по следующим формулам:

$$X = \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) \frac{dP_n^m(\cos\theta)}{d\theta}$$

$$Y = \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (g_n^m \sin m\lambda + h_n^m \cos m\lambda) \frac{mP_n^m(\cos\theta)}{\sin\theta}$$

$$Z = \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) (n+1) P_n^m(\cos\theta)$$

где $g_n^m, h_n^m, P_n^m(\cos\theta)$ – соответственно коэффициенты Гаусса и присоединенные функции Лежандра в нормировке Шмидта степени n и порядка m , θ – дополнение географической широты, λ – географическая долгота точки наблюдения.

Применительно к нашему случаю формулы приобретут следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta X_i &= \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (\Delta g_n^m \cos m\lambda_i + \Delta h_n^m \sin m\lambda_i) \frac{dP_n^m(\cos\theta_i)}{d\theta} \\ \Delta Y_i &= \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (\Delta g_n^m \sin m\lambda_i + \Delta h_n^m \cos m\lambda_i) \frac{mP_n^m(\cos\theta_i)}{\sin\theta_i} \\ \Delta Z_i &= \sum_{n=1}^n \sum_{m=0}^n (\Delta g_n^m \cos m\lambda_i + \Delta h_n^m \sin m\lambda_i) (n+1) P_n^m(\cos\theta_i) \end{aligned} \right.$$

где $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ – приращения (скачкообразные изменения) элементов геомагнитного поля на i -обсерватории, $\Delta g_n^m, \Delta h_n^m, P_n^m(\cos\theta_i)$ – соответственно приращения коэффициентов Гаусса и присоединенные функции Лежандра в нормировке Шмидта степени n и порядка m для i -обсерватории, θ_i, λ_i – соответственно дополнение географической широты и географическая долгота i -обсерватории. Решая полученную систему уравнений относительно коэффициентов Гаусса, можно определить их приращения.

Сферический гармонический анализ геомагнитного поля по данным 115 магнитных станций, проведенный для эпох 20 июля 2004 г. и 30 июля 2004 г. (соответственно период спокойного поведения поля, предшествующий буре, а также период спокой-

ного поля после завершения бури), показал, что после бури коэффициент g_1^0 , характеризующий поле аксиального диполя, скачкообразно увеличился на 11 нТл, в то время как остальные коэффициенты изменились незначительно. Это свидетельствует в пользу того, что магнитные бури могут подмагничивать источники главного поля Земли.

Построены карты фактически наблюдаемых и рассчитанных величин скачкообразных изменений компонент $\Delta X_i, \Delta Y_i, \Delta Z_i$ (рис. 3).

На карте наблюдаемых скачков по Z -компоненте выделяются положительные и отрицательные экстремумы величиной +37,5 нТл (Антарктика) и -25 нТл (Антарктида). Американскому континенту соответствует отрицательный экстремум -15 нТл.

Изолинии нулевого значения скачка проходят вблизи земного экватора в восточном полушарии, а в западном полушарии наблюдается значительное отклонение на север в районе Американского континента. Еще одна нулевая изолиния проходит также в области Антарктиды (рис. 3а).

Карта рассчитанных величин поля по своей морфологии близка к наблюдаемым значениям скачков (рис. 3б).

На картах северной компоненты отмечается обширный экстремум субширотного простираения величиной +25 нТл, совпадающий с Южно-Американским континентом, и второй экстремум -32,5 нТл, наблюдаемый в южной части Евразии.

Рассчитанная карта по морфологии и величине поля также близка к наблюдаемой (рис. 3в, 3г).

И, наконец, на картах восточной компоненты скачки имеют величины от -12 до +12 нТл. Две нулевые изолинии имеют субмеридиональное направление.

Карта рассчитанных значений также сохраняет общие черты с наблюдаемыми данными (рис. 3д, 3е).

Модель источников, задействованных в эффекте скачков поля и объясняющих положение экстремумов на картах, можно представить набором 6 диполей постоянно-

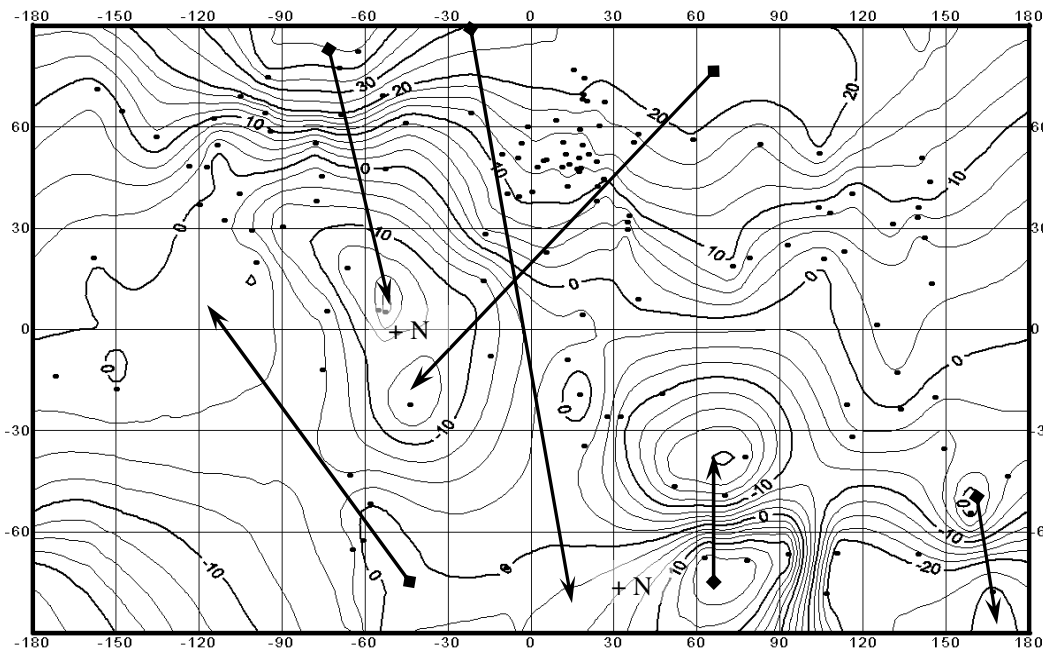


Рис. 3а. Карта наблюдаемой величины приращения поля в вертикальной компоненте на дневной поверхности Земли по данным обсерваторий (местоположение обсерваторий показаны точками) для эпохи 22 – 30 июля 2004 г., стрелки – предполагаемое положение диполей. Изолинии проведены через 2,5 нТл

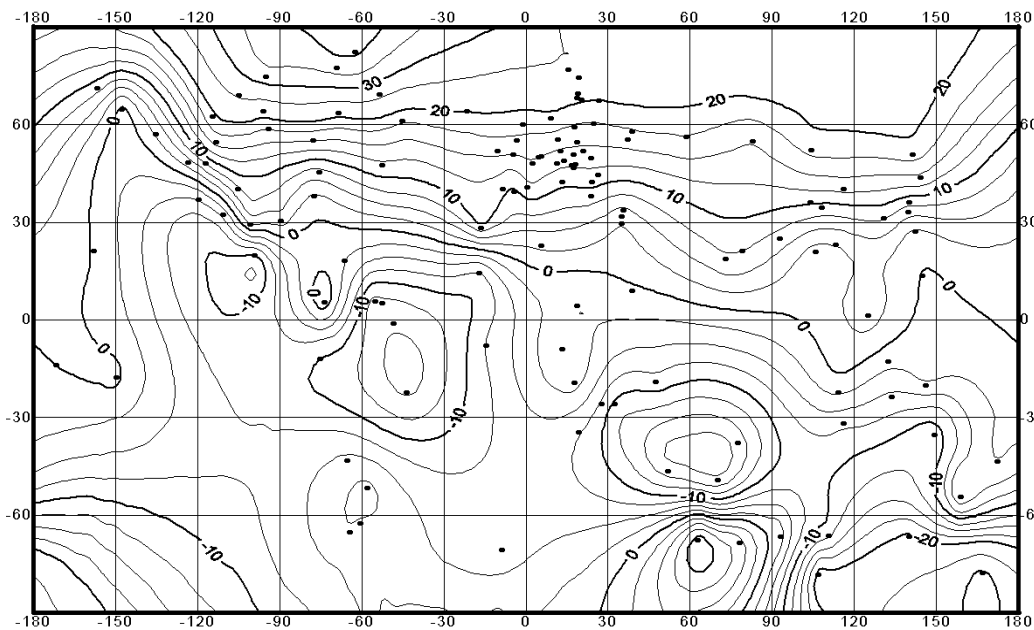


Рис. 3б. Карта рассчитанного в модели приращения поля в вертикальной компоненте на дневной поверхности Земли для эпохи 22–30 июля 2004 г. Изолинии проведены через 2,5 нТл

го магнитного поля. Их предполагаемое положение показано стрелками (рис. 2а). Направление стрелки соответствует северному положительному полюсу диполя. Они включают главный диполь и диполи второго порядка (источники материковых аномальных полей).

Отсюда можно сделать вывод о том, что скачкообразное изменение поля под влиянием магнитных бурь обусловлено источниками главного магнитного поля Земли. Полученные данные свидетельствуют о том, что после магнитной бури 22–30 июля 2004 г. геомагнитное поле

скачкообразно возросло и изменило направление. Это может быть объяснено только соответствующим увеличением магнитного момента источников поля.

Оценим величину изменения магнитного момента источника дипольного поля Земли. Магнитный момент можно определить по следующей формуле:

$$M = R^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2},$$

где R – радиус Земли в метрах ($R \approx 6400$ км).

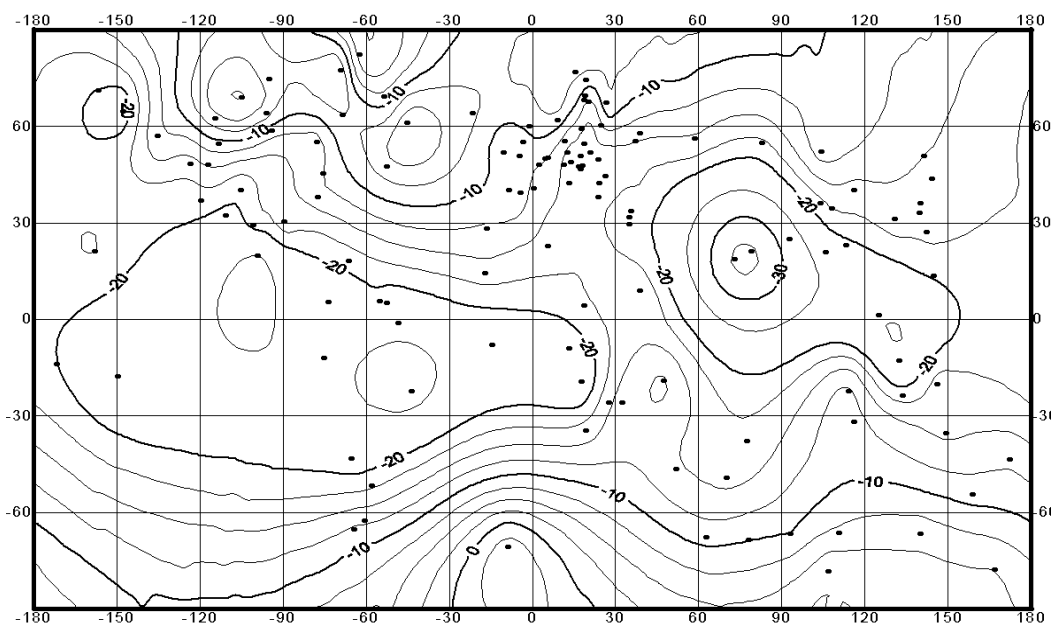


Рис. 3в. Карта наблюдаемого приращения поля в северной компоненте для эпохи 22–31 июля 2004 г.

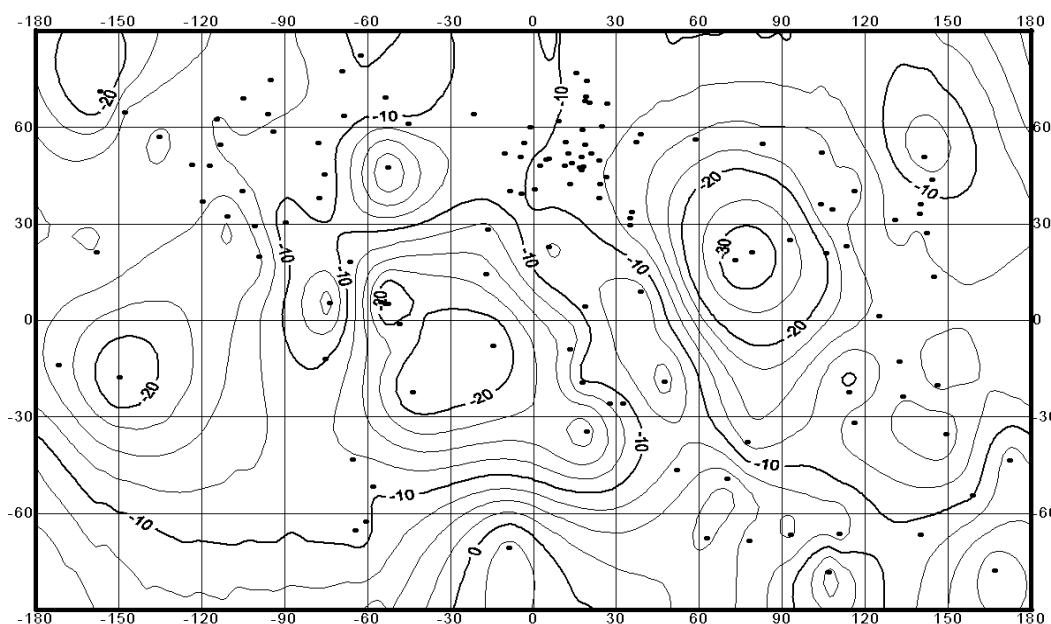


Рис. 3г. Карта рассчитанного в модели приращения поля в северной компоненте для эпохи 22–31 июля 2004 г.

В нашем случае необходимо рассчитать приращение магнитного момента. Формула примет вид:

$$\Delta M = R^3 \sqrt{(\Delta g_1^0)^2 + (\Delta g_1^1)^2 + (\Delta h_1^1)^2} .$$

В результате сферического гармонического анализа были определены коэффициенты $\Delta g_1^0 = +11$ нТл, $\Delta g_1^1 = -0,2$ нТл, $\Delta h_1^1 = +0,3$ нТл.

Подставив значения в формулу, получим $\Delta M = 2,9 \cdot 10^{19}$ А·м², что составляет $\approx 0,05\%$ от величины современного дипольного момента Земли ($M \approx 8 \cdot 10^{22}$ А·м²).

Таким образом, выявлен эффект скач-

кообразного увеличения магнитного момента источника дипольного поля Земли под влиянием магнитных бурь на фоне постоянного его уменьшения, наблюдаемого за последние 400 лет (за этот период он уменьшился на 25%). Это может свидетельствовать о подмагничивании источников главного поля Земли магнитными бурями.

По данным наблюдений уральских обсерваторий «Екатеринбург» (с 1887 по 1932 гг.), «Высокая Дубрава» (с 1932 по 1973 гг.) и «Арти» (с 1969 по 2006 гг.) выделены эпохи, в которые вековая вариация испытывает большие скачкообразные изменения, связанные с магнитными бурями.

Такие изменения разной величины и в основном в сторону увеличения поля прослеживаются в его вариациях по всем годам. В связи с этими данными обсерваторских наблюдений можно предполагать, что вековые вариации в значительной степени могут быть обусловлены магнитными бурями и формироваться за счет влияния Солнца на источники главного магнитного поля Земли. Причем влияние Солнца в основном приводит к подмагничиванию источников главного магнитного поля.

Выводы

По обсерваторским данным выявлены скачкообразные приращения главного магнитного поля Земли, имеющие величины до 45 нТл, наблюдаемые после магнитных бурь. Магнитные бури влияют на источники главного магнитного поля Земли, приводят к изменению их магнитного момента. Так, после магнитных бурь, наблюдаемых в периоды 22–30 июля и 7–12 ноября 2004 г., отмечается рост величины дипольного магнитного момента Земли примерно на 0,05% на фоне длительного процесса его уменьшения, отмечаемого за последние столетия. В связи с этим можно предположить, что и магнитный момент источников, и вековые вариации главного магнитного поля Земли в значительной степени и напрямую находятся под влиянием солнечных процессов.

Литература

1. Калинин Ю. Д. Геомагнитные вековые вариации в СССР и внутреннее строение Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1946. 48 с. (Тр. Научно-исследов. Института земного

магнетизма. Сер. VI, вып. 6).

2. Orlov V. P. The leading trends of the secular variation investigation // J. Geomagnet. and Geoelectr. 1965. 17. № 3–4.

3. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: Изд-во Ленингр. ун-в-та, 1978. 591 с.

4. Петрова Г. Н. Вековые вариации и граница ядро-мантия // Геомагнитные исследования, 1976. № 17. С. 15–21.

5. Петрова Г. Н. Бурлацкая С. П. Современные представления о вековых вариациях // Проблемы изучения вековых вариаций магнитного поля Земли. Владивосток: Изд. АН СССР, 1979. С. 5–15.

6. Тяпкин К. Ф. Геомагнитная модель тектоносферы Земли // Геофизический журнал, 1997. 19. № 3. С. 16–24.

7. Яременко Л. Н., Мищенко, Ю. П., Шендеровская О. Я. О различиях вековых геомагнитных вариаций в Арктике и Антарктике // Геофизический журнал, 2001. 23. № 12. С. 67–72.

8. Брагинский С. И. О теории магнитного поля Земли // О. Ю. Шмидт и советская геофизика 80-х годов. М.: 1983. С. 98–105.

9. Головкин В. П., Зверева Т. И., Чернова Т. А. Годовая вариация магнитного поля Земли // Геомагнетизм и аэрономия, 2004. Т. 44. № 1. С. 129–134.

10. Кусонский О. А., Бородин П. Б., Мигачев А. Е., Хрущева В. В. Особенности векового хода геомагнитного поля по данным обсерваторий Урала // 170 лет обсерваторских наблюдений на Урале: история и современное состояние / Материалы Международного семинара, Екатеринбург, 17–23 июля 2006 г. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. С. 116–118.