

УДК 550.38.072:681.3

© А.В. Воробьев

А.В. Воробьев

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ГЕОМАГНИТНОЙ ПСЕВДОБУРИ

Введение

В современном мире специалисты, научный интерес которых находится в области биологии, медицины, геофизики, геологии, техники, социологии, психологии и многих других наук, уделяют все большее внимание сопоставлению параметров внешних геомагнитных вариаций (ГМВ) с тенденциями существования и развития под их влиянием объектов и систем различной природы происхождения, а также последующему анализу полученных результатов. В основе своей этот интерес несет в себе идею того, что на основании накопленных статистических данных некоторые составляющие ГМВ или их определенное сочетание с достаточной вероятностью могут непосредственно или косвенно воздействовать как на биологические, технические, геологические и прочие объекты и системы в целом, так и на человека в частности. Как результат, искаженные нормальные условия существования рассматриваемой системы вынуждают ее либо приспосабливаться к изменениям окружающей магнитной обстановки (по средствам деформации, мутации и т.п.), либо продолжать существовать в ней в стрессовом (неустойчивом) режиме [1, 2].

Краткий обзор параметров геомагнитного поля и его вариаций

Современная наука полагает, что внешнее ядро Земли жидкое и преимущественно металлическое, а ферромагнитные элементы, такие, как железо и никель, являются одними из его основных компонент (на глубинах более 670 км) и составляют при этом массовую долю ядра планеты ~85,5% и ~5,2% соответственно, то есть суммарно более 90%.

Непрерывное вращение Земли в целом и ее ядра в частности обуславливает наличие в нем постоянных течений и соответствующих им электрических токов, обеспечивающих согласно законам магнитной гидродинамики наличие геомагнитного поля [3, 4]. При этом, в силу сложной и неоднородной структуры геомагнитосферы (рис. 1), ее силовые характеристики распределены по поверхности планеты и в околоземном пространстве крайне неравномерно. Так, на основании результатов наблюдений, проводимых в данной области, установлено, что индукция геомагнитного поля на границе магнитосферы –

магнитопаузе (рис. 1) – соответствует ~10,0 мТл, у поверхности Земли на экваторе ~20-40 мкТл, а у полюсов ~60-70 мкТл.

Кроме этого, вследствие ряда периодических, реже иррациональных событий различной мощности и природы происхождения, способствующих отклонению силовых характеристик поля от некоторых установившихся значений, приведенные параметры являются весьма усредненными и по причине имеющих место геомагнитных вариаций носят преимущественно вероятностный характер.

Под геомагнитными вариациями, в свою очередь, традиционно принято понимать отклонения реально наблюдаемых амплитудно-частотных параметров магнитосферы Земли от некоторых расчетных значений, условно принимаемых за нормальное (невозмущенное) состояние магнитосферы B_0 .

В табл. 1 рассматривается вариант классификационной схемы ГМВ, включающий в себя наиболее изученные причины их возникновения, а также количественную оценку их амплитудно-частотных и вероятностных характеристик [5]. (В случае уточнения приведенных здесь данных, классификационная схема-таблица может быть соответствующим образом скорректирована и дополнена.)

Анализируя представленные в табл. 1 данные, справедливо сделать заключение о том, что в большинстве своем ГМВ укладываются в амплитудно-частотный диапазон слабых низкочастотных магнитных полей, ограничивающийся пределами: $\Delta B = [3 \cdot 10^{-9} - 20 \cdot 10^{-6}]$ Тл; $f = [0 - 8]$ Гц. Таким образом, к примеру, индукция магнитного поля у поверхности Земли на экваторе и у полюсов будет оцениваться как ~30 мкТл $\pm \Delta B$ и ~65 мкТл $\pm \Delta B$ соответственно.

Постановка задачи исследования

В настоящее время задача исследования и анализа параметров ГМВ частично решается посредством сети магнитных обсерваторий – научных учреждений, в которых производятся параметрические наблюдения магнитосферы Земли и необходимые для них астрономические. В первую очередь среди организаций такого профиля следует отметить следующие:

- Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, Россия;

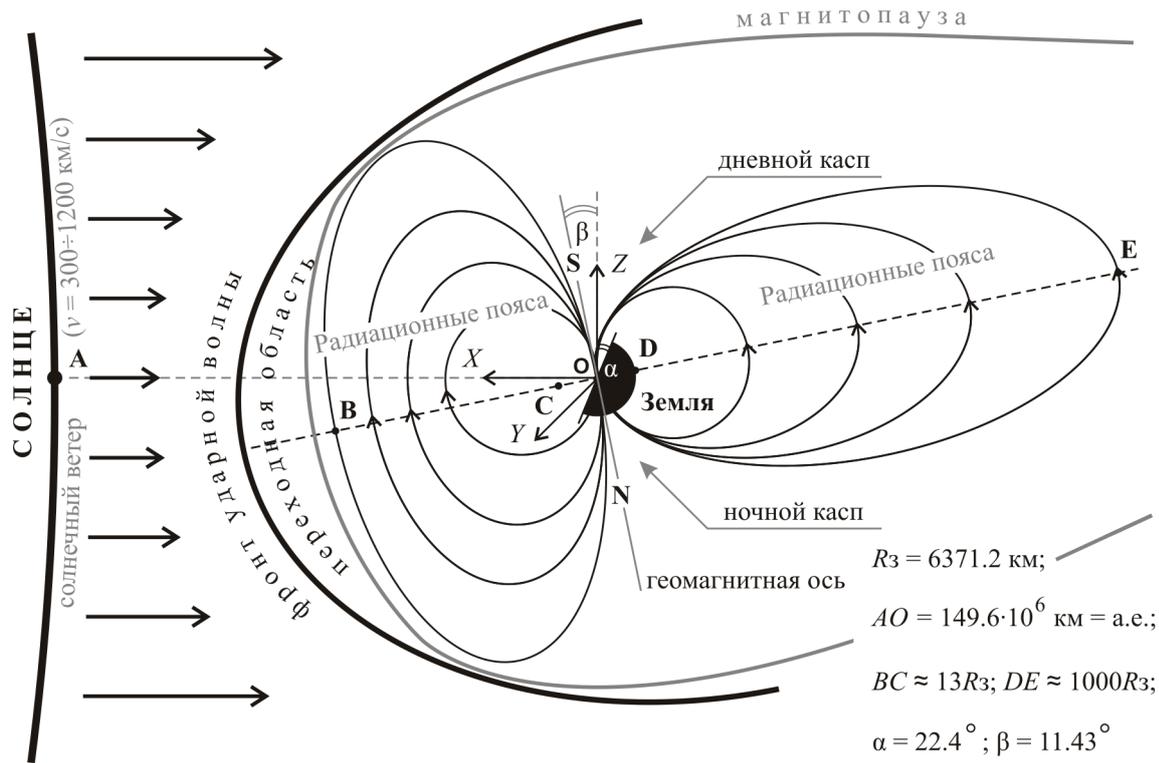


Рис 1. Структура магнитосферы Земли

Таблица 1

Классификационная схема геомагнитных вариаций

Классификационные признаки ГМВ				
Генетический	Вероятностный		Морфологический	
Природа происхождения	Вероятность возникновения P , [%]	Вероятный период активности T , ч	Диапазон амплитуд $\pm \Delta B$, [нТл] или [гамма]	Диапазон частот f , [Гц] (период)
Вращение Земли вокруг собственной оси	100	—	10-200	$\sim 11,6 \cdot 10^{-6}$ (23 ч, 56 мин, 4 с)
Вращение Луны вокруг Земли	100	—	2-5	$\sim 11,2 \cdot 10^{-6}$ (24 ч, 50 мин)
Вращение Солнца вокруг собственной оси	100	—	40-60	$\sim 4,6 \cdot 10^{-7}$ (25 дн., 9 ч, 7 мин, 13 с)
Вращение Земли вокруг Солнца	100	—	10-200	$\sim 31,7 \cdot 10^{-9}$ (365 дн., 6 ч, 9 мин, 10 с)
Вращение Солнца вокруг собственной оси	100	—	10-30	$\sim 1,4 \cdot 10^{-9}$ (20-22 г.)
Внутриземные магнитные аномалии	зависит от координат	—	до $20 \cdot 10^3$	~ 0
Движение вещества и волновые процессы в ядре Земли	100	—	10-120	$\sim 2,5 \cdot 10^{-10}$ (10-50 лет)
Солнечный ветер	$\sim 5-7$	40-50	$(0,05-1,5) \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^{-5}$ (10-72 ч)
Резонанс Шумана	$\sim 25-70$	4-7	$(0,1-1,8) \cdot 10^{-3}$	7-8

- Национальный исследовательский Томский государственный университет (ТГУ), г. Томск, Россия;
- Национальное управление океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), г. Роквилл (Rockville), США (USA);
- Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration, NASA), г. Вашингтон (Washington, D. C.), США (USA) и др.

Публикуемые учеными-специалистами результаты исследований по данной тематике во многом отражают характер и динамику изменения параметров ГМП в стационарной точке земной поверхности, заданной географическими координатами и высотой над уровнем моря. При этом остается неясным, насколько существенное воздействие на объект (первостепенно биологической природы происхождения) оказывают частные ГМВ, имеющие место лишь по отношению к данному конкретному объекту, наводимые в объеме пространства существования этого объекта, при его перемещении в условиях анизотропии геомагнитосферы.

В связи с этим приоритетной научной задачей описываемых в настоящей статье исследований является выделение, анализ и оценка основных параметров и свойств так называемых частных ГМВ, имеющих место, в условиях объективно невозмущенного состояния ГМП.

Интуитивный образ геомагнитной псевдобури

Для наглядности примера демонстрации эффекта геомагнитной псевдобури сопоставим магнитное воздействие, наводимое на некоторый стационарный объект со стороны возмущенного геомагнитного поля, с силовым воздействием, оказываемым на подобный объект, находящийся в постоянно меняющемся своем направлении и скорости потоке анизотропной жидкости. Данная аналогия в некотором роде позволяет отразить динамику наводимых магнитно-силовых воздействий со стороны реальных магнитных бурь на исследуемый статический объект или систему.

Далее, сохраняя анизотропию жидкости, качественно оценим силовые воздействия, оказываемые на тот же объект в условиях статичности среды, но ненулевой линейной и угловой скорости исследуемого объекта. Очевидно, что общая динамика воздействий в изменившихся условиях будет сопоставима с динамикой, рассмотренной в предыдущем примере, и зависит как от скорости объекта, так и от градиента неоднородности среды.

Спроецировав данную аналогию на объект или систему, находящуюся в анизотропном магнитном поле, с целью формализации такого рода воздействий, можно предложить ввести понятие геомагнитной псевдобури (ГМПБ), которое призвано отражать характерные воздействия реальных магнитных бурь на объект в условиях анизотропии невозмущенного ГМП и ненулевой скорости этого объекта.

Моделирование и оценка параметров невозмущенного состояния ГМП

Определим полный вектор индукции магнитного поля Земли в точке географического пространства, заданной пространственно-временными координатами (широта, долгота, высота над уровнем моря и год), как сумму трех составляющих:

$$\mathbf{B}_{ge} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 + \mathbf{B}_3,$$

где \mathbf{B}_1 – вектор индукции геомагнитного поля внутренних источников; \mathbf{B}_2 – регулярная составляющая вектора индукции геомагнитного поля магнитосферных токов, вычисляемая в солнечно-магнитосферной системе координат [6]; \mathbf{B}_3 – иррациональная составляющая вектора индукции геомагнитного поля магнитосферных токов, в том числе и техногенной природы происхождения.

Магнитное поле внутренних источников \mathbf{B}_1 отражает преимущественно силовые характеристики невозмущенного геомагнитного поля, порожаемого главным образом полями электрических токов в земном ядре (главное поле) и составляющего ~98% всего поля. Поля же земного магнетизма, которые обуславливаются магнитными свойствами горных пород, составляют ~2% всего поля. При этом поле земной коры убывает с высотой значительно быстрее, чем главное поле, и, начиная с высоты ~100 км, им практически пренебрегают [7].

Представим модель главного поля рядами сферических гармоник, в зависимости от географических координат. (Известно, что подобный подход при длине ряда 10-13 гармоник обеспечивает погрешность вычисления главного ГМП на величину не более ~2% [7].)

В таком случае скалярный потенциал индукции геомагнитного диполя внутриземных источников U [нТл·км] в точке пространства со сферическими координатами r, θ, λ определится согласно выражению:

$$U = R_3 \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda) \right) \left(\frac{R_3}{r} \right)^{n+1} P_n^m \cos(\theta), \quad (1)$$

где r – расстояние от центра Земли до точки наблюдения (геоцентрическое расстояние), [км];
 λ – долгота от Гринвичского меридиана, [градусы];

θ – полярный угол (дополнение до широты, $\theta = (p/2) - \varphi'$, [градусы], где φ' – широта в сферических координатах, [градусы]); $R_3 = 6371,03$ – средний радиус Земли, (км); $g_n^m(t), h_n^m(t)$ – сферические гармонические коэффициенты (нТл), зависящие от времени; P_n^m – нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра степени n порядка m [8].

В специализированной литературе выражение (1) широко известно как ряд Гаусса и общепризнанно в качестве международного эталона невозмущенного состояния магнитосферы Земли. То есть допустимо предположить, что $B_0 \approx B_1$, где B_0 – индукция невозмущенного геомагнитного поля в локальной точке земной поверхности.

По причине временных вариаций главного поля коэффициенты гармонических рядов (сферические гармонические коэффициенты) периодически (раз в 5 лет) пересчитывают с учетом новых данных, устанавливаемых экспериментально.

Изменения главного поля за один год – так называемый вековой ход – также представляются рядами сферических гармоник. Результаты их расчета публикуются в том числе Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), г. Роквилл (Rockville), США (USA), и доступны на интернет-ресурсе: <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf11coeffs.txt>.

Нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра P_n^m , заявленные в выражении (1), представляют собой в общем случае ортогональный многочлен, определяемый здесь в соответствии с выражением:

$$P_n^m(\cos\theta) = 1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n - 1) \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_m}{(n + m)!(n - m)!}} \times \\ \times \sin^m \theta \left[\cos^{n-m} \theta - \frac{(n-m)(n-m-1)}{2(2n-1)} \cos^{n-m-2} \theta + \right. \\ \left. + \frac{(n-m)(n-m-1)(n-m-2)(n-m-3)}{2 \cdot 4(2n-1)(2n-3)} \cos^{n-m-4} \theta - \dots \right],$$

где ε_m – нормировочный множитель ($\varepsilon_m = 2$ для $m \geq 1$ и $\varepsilon_m = 1$ для $m = 0$); n и m – степень и порядок сферических гармоник соответственно.

На рис. 2 представлена методика расчета основных параметров геомагнитного поля и географических координат геомагнитного диполя, на



Рис. 2. Методика расчета параметров невозмущенного ГМП

основе которой в среде *Scilab 5.3.2* реализован экспериментальный программно-алгоритмического комплекс «*GEOmagnetic_1*», обеспечивающий вычисление основных параметров невозмущенного ГМП по заданным пространственно-временным координатам. Результат работы данного программного продукта для точки с координатами: 54,81° с.ш.; 56,10° в.д.; 115 м над уровнем моря; 2014 г. (северная оконечность г. Уфа, Россия) – представлен в листинге 1.

Задаваясь планетарной матрицей высот (табл. 2), обеспечивается информационная база для построения (с необходимым разрешением) «карты» количественной оценки распределения вектора геомагнитной индукции внутреземных источников B_0 по поверхности Земли с учетом топографических особенностей местности (табл. 3).

В более общем случае массивы, аналогичные табл. 3, возможно синтезировать как для оценки глобальной планетарной околоземной геомагнитной обстановки, так и с целью анализа регионального

**Результат моделирования невозмущенного состояния ГМП
по средствам экспериментального программно-методического комплекса «GEOmagnetic_1»**

*****GEOmagnetic_1*****

***Физические (инвариантные) параметры Земли:

Средний радиус Земли, [км] $R = 6371.03$

Большая полуось Земного эллипсоида вращения, [км] $a = 6378.16$

Малая полуось Земного эллипсоида вращения, [км] $b = 6356.78$

***Пространственно-временные координаты:

Северная широта (географические координаты), [градусы]: 77.72000

Восточная долгота (географические координаты), [градусы]: 104.30000

Высота над уровнем моря, [км]: $h = 0.01500$

год 2014

***Расчет сферических координат и полярного угла:

Долгота (сферические координаты), [рад]: $lamda = 1.82038$

Широта (сферические координаты), [рад]: $fi_sh = 1.35506982$

Полярный угол, [рад]: $tetta = 0.21572651$

Геоцентрическое расстояние, [км]: $r(h) = 6357.79708$

***Параметры геомагнитного диполя:

координата географической широты северного геомагнитного полюса,
[градусы с.ш.]: 80.24514

координата географической долготы северного геомагнитного полюса,
[градусы з.д.]: 72.54060

магнитный момент геомагнитного диполя, [Тл*м³]: $M = 7679687630913062.0$

***Расчет параметров вектора геомагнитной индукции внутриземных источников:

Потенциал индукции геомагнитного поля внутриземных источников, [нТл*км]:

$U = -188547425.24317393$

Составляющая вектора индукции геомагнитного поля, [нТл]: $V_x = 4474.22683$

Составляющая вектора индукции геомагнитного поля, [нТл]: $V_y = 793.78722$

Составляющая вектора индукции геомагнитного поля, [нТл]: $V_z = 59058.17646$

Полный вектор магнитной индукции внутриземных источников, [нТл]: $V = 59232.73596746$

Магнитное склонение - угол между географическим и

магнитным меридианом (положительное к востоку), [градусы]: $D = 10.06035$

Магнитное наклонение - угол между горизонтальной плоскостью xy

и направлением вектора V (положительное при направлении вектора V вниз), [градусы]: $I = 85.60018$

***Потенциал геомагнитных псевдобурь (ГМПБ) G :

Потенциал ГМПБ по широте: $d(B)/d(tetta)$, [нТл/рад]: $G_tetta = 1034.39773$

Потенциал ГМПБ по долготы: $d(B)/d(lamda)$, [нТл/рад]: $G_lamda = 992.42398$

Потенциал ГМПБ по высоте: $d(B)/d(r)$, [нТл/км]: $G_r = -27.06819$

Таблица 2

Массив (карта) планетарного распределения параметра h , км

долгота \ широта	150° З.Д	120° З.Д	90° З.Д	60° З.Д	30° З.Д	0°	30° В.Д	60° В.Д	90° В.Д	120° В.Д	150° В.Д	180° В.Д
80° с.ш.	0	0	0	1,5	0,2	0	0	0	0	0	0	0
60° с.ш.	0,75	0,75	0	0	0	0	0,1	0,35	0,75	0,35	1,0	0
40° с.ш.	0	1,5	0,25	0	0	0	1,0	0,1	1,5	0,1	0	0
20° с.ш.	0	0	0,1	0	0	0,75	0,35	0	0	0	0	0
0° (экватор)	0	0	0	0,1	0	0	1,0	0	0	0,1	0	0
20° ю.ш.	0	0	0	0,1	0	0	1,5	0	0	0	0	0
40° ю.ш.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60° ю.ш.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
80° ю.ш.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 3

Массив (карта) количественной оценки распределения параметра B_0 , мкТл на 2014 г.

долгота \ широта	150° З.Д	120° З.Д	90° З.Д	60° З.Д	30° З.Д	0°	30° В.Д	60° В.Д	90° В.Д	120° В.Д	150° В.Д	180° В.Д
80° с.ш.	57,6	57,5	56,9	55,9	54,9	54,5	55,3	56,9	58,3	58,7	58,3	57,8
60° с.ш.	55,1	59,0	59,8	56,2	51,4	49,7	51,5	56,5	61,6	61,2	55,5	52,7
40° с.ш.	44,1	51,5	55,3	49,7	43,3	43,0	46,1	51,0	55,8	54,2	44,6	40,3
20° с.ш.	35,0	39,9	43,1	38,6	34,1	35,5	39,0	42,5	44,5	42,7	35,3	32,9
0° (экватор)	32,4	31,2	30,5	28,1	28,5	32,8	34,7	38,2	43,1	41,6	38,1	34,7
20° ю.ш.	37,0	30,6	24,2	20,2	24,4	28,8	29,6	39,8	51,9	52,9	50,3	44,0
40° ю.ш.	47,1	38,6	26,9	19,2	22,4	23,4	26,7	42,2	58,0	64,5	62,5	55,4
60° ю.ш.	57,6	49,3	38,1	29,3	27,1	27,2	33,0	45,9	59,5	67,8	68,5	64,0
80° ю.ш.	59,1	55,6	50,7	45,8	43,0	43,4	47,1	52,4	56,8	59,6	60,8	60,8

распределения вектора геомагнитной индукции внутреземных источников в заданном статическом временном интервале либо в динамическом режиме.

Исследование параметров и моделирование эффекта геомагнитной псевдобури

Предложив и обосновав целесообразность введения понятия геомагнитной псевдобури, рассмотрим далее его характерные параметры и приведем математические выражения их количественной оценки:

Амплитуда геомагнитной псевдобури – максимальное приращение значения вектора магнитной индукции, возникающее в объеме существования наблюдаемого объекта в результате его пространственного околоземного перемещения из точки A в точку B :

$$B_{amp} = B_{0,B} - B_{0,A}$$

где $B_{0,A}$ и $B_{0,B}$ – индукция геомагнитного поля внутреземных источников в начальной и конечной точке перемещения объекта соответственно, [нТл].

Интенсивность ГМПБ – физическая величина, численно равная скорости нарастания (спада) силовой характеристики геомагнитного поля внутреземных источников с течением времени относительно системы отсчета, связанной с объектом, перемещающимся в околоземном пространстве:

$$I_B = \frac{\partial B}{\partial t} \approx \frac{B_{0,B} - B_{0,A}}{t_2 - t_1} \cdot 10^3,$$

где I_B – интенсивность ГМПБ, [пкТл]; t_1 и t_2 – начальный и конечный момент времени соответственно, в течение которого наблюдается перемещение объекта.

Частота ГМПБ – физическая величина, качественно отражающая частотные свойства магнитного поля, воздействующего на исследуемый объект, и определяемая в соответствии с выражением:

$$f_B = \frac{1}{2\Delta t}, \tag{2}$$

где Δt – интервал времени, затраченный на перемещение объекта из точки A в точку B .

В более общем случае Δt – интервал времени между двумя соседними расчетными данными силовой характеристики геомагнитного поля внутриземных источников для соответствующих точек географического пространства, аналогичный по сути показателю разрешающей способности или шагу дискретизации (рис. 3). При необходимости частотный анализ информационного сигнала возможно производить посредством дискретных фурье-преобразований, но учитывая, что высокочастотные ГМПБ, вызванные перемещением объекта в околоземном пространстве с соответствующей скоростью, в настоящее время маловероятны, то использование выражения (2) для описания эквивалентной частоты ГМПБ является в достаточной мере целесообразным и оправданным.

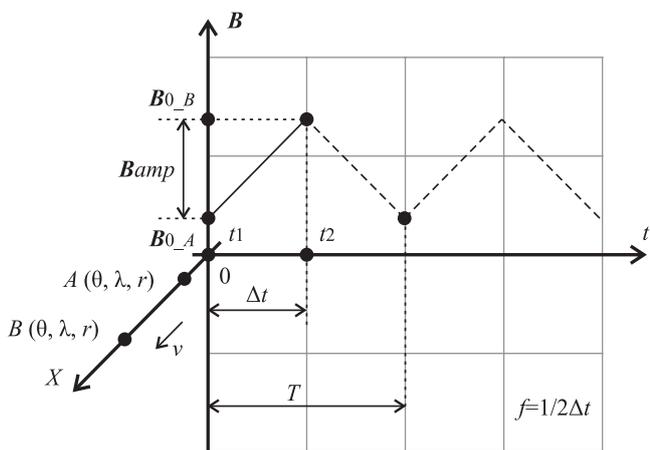


Рис. 3. К пояснению понятия частоты геомагнитной псевдобури

Градиент геомагнитной индукции – вектор в трехмерном пространстве, своим направлением указывающий направление наискорейшего возрастания абсолютного значения индукции геомагнитного поля внутриземных источников, равный по модулю скорости роста B_0 в данном географическом направлении, [нТл/рад; нТл/рад; нТл/км].

$$G_B = \nabla B_0(\theta, \lambda, r) = grad B_0(\theta, \lambda, r) = \left(\frac{\partial B_0}{\partial \theta \lambda}, \frac{\partial B_0}{\partial \theta}, \frac{\partial B_0}{\partial r} \right),$$

где B_0 , согласно методике, представленной на рис. 2, и выражению (1), определится соотношением (3).

Анализ количественной оценки градиента геомагнитной индукции в свою очередь обеспечивает фундамент суждений о направлении максимальной интенсивности потенциально имеющих место в дан-

ной области географического пространства ГМПБ. Таким образом, G_B в первую очередь имеет смысл учитывать в процессе разработки и построения морских и авиационных и аэрокосмических навигационных карт.

$$B_0^2(r, \lambda, \theta)_{[нТл]} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \cos(\varphi - \varphi') + \frac{\partial U}{\partial r} \sin(\varphi - \varphi') \right]^2 + \left[\frac{1}{r \cdot \sin \theta} \frac{\partial U}{\partial \lambda} \right]^2 + \left[\frac{\partial U}{\partial r} \cos(\varphi - \varphi') - \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \sin(\varphi - \varphi') \right]^2,$$

где φ – широта (положительная к северу); φ' – широта в сферических координатах; λ – долгота (положительная к востоку); θ – дополнение до широты; r – геоцентрическое расстояние с учетом сжатия Земли.

В табл. 4 (в качестве примера) согласно данным определениям и математическим формулировкам приведены результаты моделирования основных параметров геомагнитных псевдобурь для ряда тестовых точек.

Более детальные исследования параметров эффекта геомагнитных псевдобурь показали, что градиент индукции геомагнитного поля внутриземных источников по широте и долготу занимает достаточно широкий диапазон (0,5-50 мкТл/рад) и может принимать как положительные, так и отрицательные значения, отражая тем самым анизотропию невозмущенного ГМП. Градиент же индукции магнитного поля Земли по высоте над уровнем моря (геоцентрическому расстоянию) находится в диапазоне $-10 \dots -30$ нТл/км и всегда отрицателен, что свидетельствует о том, что интенсивность ГМПБ в пространстве жизнедеятельности биосферы (поверхность Земли, нижние слои тропосферы) всегда выше, чем за ее пределами (верхние слои тропосферы, стратосфера, мезосфера и т.д.).

Заключение и выводы

В результате проводимых исследований предложено, описано и смоделировано явление эффекта геомагнитной псевдобури, а также выделен ряд свойственных ему параметров и характеристик. Предложен комплекс математических и программно-методических средств, обеспечивающих их расчет и количественную оценку.

Анализ данных, представленных в табл. 1, и результатов моделирования параметров ГМПБ (табл. 4) позволяет сделать вывод о том, что ГМПБ по ряду своих амплитудно-частотных характеристик не только сопоставимы с ГМВ, вызываемыми в результате вращения Земли вокруг собственной оси и солнечным ветром, но в ряде случаев превосходят их по своим силовым и частотным показателям.

Таблица 4

Параметры геомагнитных псевдобурь на 2014 г.

Параметр Точка	Географическая привязка к местности	Расстояние по прямой от А до В, км	B_{amp} , мкТл	Δt , с (самолет)	I_B , пкТл/с	f_B , Гц	G, мкТл/рад; мкТл/рад; нТл/км
точка А	г. Москва 55,75 с.ш.; 37,62 в.д.; $h \approx 0,2$	—	—	—	—	—	–3,9; 7,1; –22,1
точка В1	г. Уфа 54,81 с.ш.; 56,10 в.д.; $h \approx 0,1$	1173	3,162	5400	590	$92 \cdot 10^{-6}$	–10,8; 10,3; –24,2
точка В2	г. Ижевск 58,85 с.ш.; 53,22 в.д.; $h \approx 0,1$	972	3,387	4800	710	$104 \cdot 10^{-6}$	–9,0; 10,0; –24,4
точка В3	г. Мурманск 68,97 с.ш.; 33,08 в.д.; $h \approx 0$	1491	2,084	7200	30	$69 \cdot 10^{-6}$	2,5; 5,5; –22,6
точка В4	г. Владивосток 43,12 с.ш. 131,90 в.д.; $h \approx 0$	6434	0,866	21600	0,04	$23 \cdot 10^{-6}$	42,3; –17,1; –20,9
точка В5	г. Калининград 54,72 с.ш. 20,50 в.д.; $h \approx 0$	1092	–2,222	4500	0,05	$111 \cdot 10^{-6}$	–1,6; 4,1; –21,0
точка В6	мыс Челюскин 77,72 с.ш. 104,30 в.д.; $h \approx 0$	3480	7,628	16020	480	$31 \cdot 10^{-6}$	1,0; 1,0; –27,0

Таким образом, эффект ГМПБ следует учитывать при исследовании и анализе воздействия слабых низкочастотных магнитных полей на объекты и системы различной природы происхождения, обладающие возможностью передвижения в околоземном пространстве, а также в процессах синтеза морских, авиационных и аэрокосмических навигационных карт.

Ключевые слова: геомагнитное поле, геомагнитные вариации, магнитные бури, геомагнитные псевдобури, частные геомагнитные вариации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пущаровский Ю.М. Глубины Земли: строение и тектоника мантии // Природа. – 2001. – № 3. – С. 13-15.
2. Воробьев А.В. Вопросы проектирования цифровых геомагнитных обсерваторий LAP Lambert Academic Publishing G mbh & Co. KG, Berlin, 2012 ISBN: 978-3-8443-5300-6. – С. 10-20.

3. Прист Э.Р. Солнечная магнитогеодинамика. – М. : Мир, 1985. – С. 103-154.
4. Вайнштейн С.И. Магнитные поля в космосе. – М. : Наука, 1983. – С. 11-40.
5. Воробьев А.В. О возможности применения анизотропных магниторезистивных сенсоров в геоинформационных магнитометрических системах // Приборы. – 2012. – № 1 (139). – С. 10-16.
6. ГОСТ 25645.127-85. Магнитосфера Земли. Модель магнитного поля магнитосферных токов. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
7. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутреземных источников. – М. : Изд-во стандартов, 1985.
8. Пантелеев В.Л. Теория фигуры Земли : курс лекций. – М. : Издательство МГУ. – С. 35-40.