

Рис. 3. Спектрограмма шума выходного сигнала

Таким образом, экспериментально показана возможность использования схемы измерительного канала (рис. 1) для прецизионных измерений. Разрешающая способность по сопротивлению составляет 0,00004 Ом, а максимальный уровень шума –130 дБ. Математическая модель измерительного канала и методика идентификации ее параметров могут быть использованы в программном обеспечении измерительной системы для градуировки и преобразования выходного кода АЦП в сопротивление ТПС и температуру. Установлено, что измерительный канал об-

ладает высокой точностью измерений, а максимальная погрешность градуировки определяется погрешностью эталона.

Библиографические ссылки

1. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ. – Принят Государственной Думой 11.11.2009 г.
2. Куликов В. А., Никитин К. А. Исследование градиентного датчика малых тепловых потоков в грунте // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 186–192.
3. Куликов В. А., Сяктерева В. В. Динамические изменения теплопроводности грунта с применением линейного нагревателя – датчика температуры // Вестник ИжГТУ. – 2011. – № 2(50). – С. 137–140.
4. Куликов В. А., Никитин К. А. Идентификация параметров измерительного канала термометра высокого разрешения // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании : сб. тр. науч.-техн. конф. факультета «Информатика и вычислительная техника» ИжГТУ. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2010. – С. 188–191.

V. A. Kulikov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University
K. A. Nikitin, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

High Definition Temperature Measurement Channel

The scheme of high resolution temperature measurement channel with resistance thermal converter is presented in this paper. The method of identifying its parameters and the results of investigating the metrological parameters are discussed.

Key words: measuring channel, parameters identification, resistance thermal converter, metrological characteristics.

УДК 550.34.098

Г. В. Миловзоров, доктор технических наук, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

А. В. Воробьев, кандидат технических наук, докторант, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

Д. Г. Миловзоров, кандидат технических наук, Уфимский государственный авиационный технический университет

МЕТОДИКА ОПИСАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМАГНИТНОЙ ПСЕВДОБУРИ

Вводится и обсуждается понятие эффекта геомагнитной псевдобури, а также предлагается подход к оценке ряда его физических параметров.

Ключевые слова: геомагнитное поле, геомагнитные вариации, магнитная буря, геомагнитная псевдобуря.

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 настоящее время задача регистрации параметров ГМВ, как правило, решается посредством сети магнитных обсерваторий – научных учреждений, в которых производятся параметрические наблюдения магнитосферы Земли и необходимые для них астрономические наблюдения.

Публикуемые учеными-специалистами результаты исследований по данной тематике во многом отражают характер и динамику изменения параметров геомагнитного поля (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 конкретному объекту и наводимые в объеме пространства существования этого объекта при его перемещении в условиях неоднородности невозмущенной геомагнитосферы.

Таким образом, с целью формализации такого рода воздействия со стороны ГМП здесь предлагается ввести и далее исследовать понятие *геомагнитной псевдобури* (ГМПБ) – магнитного воздействия на объект, возникающего в объеме его существования в среде невозмущенного анизотропного ГМП при условии ненулевой угловой и(или) линейной скорости этого объекта.

Краткий обзор параметров ГМП 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 компонентов (на глубинах более 670 км) и составляют при этом массовую долю ядра планеты $\approx 85,5$ и $\approx 5,2$ % 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 [1]. 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 и магнитопаузы (рис. 1) соответствует $\approx 10,03$ мТл, у поверхности Земли на экваторе $\approx 20\text{--}40$ мкТл, а у полюсов $\approx 60\text{--}70$ мкТл.

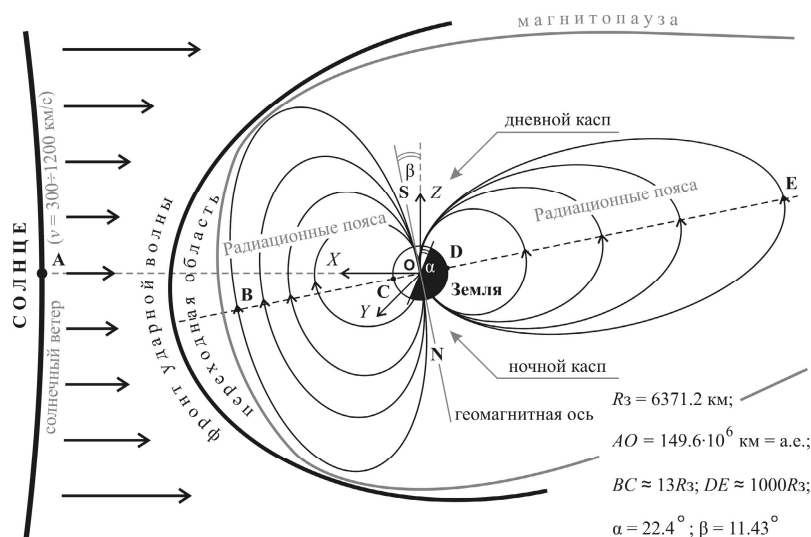


Рис. 1. Структура магнитосферы Земли

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

Под ГМВ, 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 ко-

личественную оценку их амплитудно-частотных и вероятностных характеристик [2]. (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:

$$\Delta B = [3 \cdot 10^{-9} \text{--} 20 \cdot 10^{-6}] \text{ Тл}; f = [0\text{--}8] \text{ Гц}.$$

Таким образом, к примеру, индукция ГМП у поверхности Земли на экваторе и у полюсов будет оцениваться как ≈ 30 мкТл $\pm \Delta B$ и ≈ 65 мкТл $\pm \Delta B$ соответственно.

Таблица 1. Классификационная схема ГМВ

Генетический	Классификационные признаки ГМВ		Морфологический	
	Вероятностный			
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	$\approx 11,6 \cdot 10^{-6}$ (23 ч 56 мин 4 с)
Вращение Луны вокруг Земли	100	–	2–5	$\approx 11,2 \cdot 10^{-6}$ (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	$\approx 31,7 \cdot 10^{-9}$ (365 дн. 6 ч 9 мин 10 с)
Вращение Солнца вокруг собственной оси	100	–	10–30	$\approx 1,4 \cdot 10^{-9}$ (20–22 г.)
Внутриземные магнитные аномалии	зависит от координат	–	до $20 \cdot 10^3$	≈ 0
Движение вещества и волновые процессы в ядре Земли	100	–	$10 \div 120$	$\approx 2,5 \cdot 10^{-10}$ (10–50 лет)
Солнечный ветер	$\approx 5-7$	40–50	$(0,05-1,5) \cdot 10^3$	$2-10^{-5}$ (10–72 ч)
Резонанс Шумана	$\approx 25-70$	4–7	$(0,1-1,8) \cdot 10^{-3}$	7–8

Подход к расчету параметров невозмущенного 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

$$B_{ge} = B_1 + B_2 + B_3,$$

где B_1 – вектор индукции геомагнитного поля внутриземных источников; B_2 – регулярная составляющая вектора индукции ГМП магнитосферных токов, вычисляемая в солнечно-магнитосферной системе координат; B_3 – иррациональная составляющая вектора индукции ГМП магнитосферных токов, в том числе и техногенной природы происхождения.

Магнитное поле внутриземных источников B_1 отражает преимущественно силовые характеристики невозмущенного ГМП, порождаемого главным образом полем электрических токов в земном ядре (главное поле) и составляющего ≈ 98 % всего поля. Поля же земного магнетизма, обуславливающиеся 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 [1].

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 не более ≈ 2 % [1].) В таком случае скалярный потенциал индукции геомагнитного диполя внутриземных источников U [нТл·км] в точке пространства со сферическими координатами r, θ, λ определится как

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

где r – расстояние от центра Земли до точки наблюдения (геоцентрическое расстояние), км; λ – долгота от Гринвичского меридиана, градусы; θ – полярный угол (дополнение до широты, $\theta = (\pi/2) - \varphi'$, 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 .

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

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

На рис. 2 представлена методика расчета основных параметров геомагнитного поля и географических координат геомагнитного диполя, на базе которой (в среде *Scilab 5.3.2*) реализован экспериментальный программно-алгоритмического комплекс «*GEOmagnetic_v.1*» (свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013610905. М.: РосАПО, 2013), обеспечивающий вычисление основных параметров невозмущенного ГМП по заданным пространственно-временным координатам.



Рис. 2. Методика расчета параметров невозмущенного ГМП

Определением планетарной матрицы высот обеспечивается информационная база для построения массива распределения B_0 по поверхности Земли с учетом топографических особенностей местности (табл. 2).

В более общем случае массивы, аналогичные указанным в табл. 2, возможно синтезировать как для оценки глобальной планетарной геомагнитной обстановки, так и с целью анализа регионального распределения B_0 в заданном статическом временном интервале либо в динамическом режиме.

Таблица 2. Матрица распределения параметра B_0 , мкТл, на 2014 г.

Широта	Долгота											
	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
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
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
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
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

Исследование параметров эффекта ГМПБ

На основании данных ранее определений рассмотрим характерные параметры эффекта ГМПБ и приведем аналитические выражения для их количественной оценки.

• *Амплитуда ГМПБ* – 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 ГМП внутренних источников в начальной и конечной точке перемещения объекта соответственно, нТл.

• *Интенсивность ГМПБ* – физическая величина, численно равная скорости нарастания (спада) силовой характеристики ГМП внутренних 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 перемещения объекта соответственно.

• *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 – время, затраченное на перемещение объекта из точки A в точку B .

• *Градиент ГМП* – вектор в трехмерном пространстве, своим направлением указывающий направление наискорейшего возрастания абсолютного значения индукции невозмущенного ГМП, равный по модулю скорости роста B_0 в данном географическом направлении, нТл/рад; нТл/рад; нТл/км.

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

где B_0 – значение невозмущенного ГМП в заданной точке Земли.

В табл. 3 (в качестве примера) приведены результаты моделирования основных параметров ГМПБ для ряда тестовых точек.

Дальнейшие исследования эффекта ГМПБ показали, что градиент индукции ГМП по широте и дол-

готе занимает достаточно широкий диапазон 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 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 и т. д.).

Таблица 3. Параметры геомагнитных псевдобурь на 2014 г.

Точка	Параметр						G , мкТл/рад; мкТл/рад; нТл/км
	Географическая привязка к местности	Расстояние по прямой от A до B_i , км	B_{amp} , мкТл	Δt , с (самолет)	I_B , пкТл/с	f_B , Гц	
Точка A	г. Москва 55,75 с.ш.; 37,62 в.д.; $h \approx 0,2$	Начальная точка					-3,9; 7,1; -22,1
Точка $B1$	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 $B2$	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

Заключение и выводы

Анализ данных, представленных в табл. 1, и результатов исследования параметров ГМПБ (табл. 3) позволяет сделать вывод о том, что ГМПБ по ряду своих амплитудно-частотных характеристик не только сопоставимы с реальными ГМВ, но в ряде случаев их превосходят, а следовательно, могут вызывать аналогичный отклик наблюдаемых под их воздействием объектов.

Библиографические ссылки

1. Воробьев А. В. Вопросы проектирования цифровых геомагнитных обсерваторий. – Berlin : LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. – ISBN 978-3-8443-5300-6. – С. 10–20.
2. Воробьев А. В. О возможности применения анизотропных магниторезистивных сенсоров в геоинформационных магнитометрических системах // Приборы. – 2012. – № 1(139). – С. 10–16.

G. V. Milovzorov, DSc in Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

A. V. Vorobyov, PhD in Engineering, Doctor's degree applicant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

D. G. Milovzorov, PhD in Engineering, Ufa State Aviation Technical University

Description, Research and Evaluation of the Effect «Geomagnetic Pseudo Storm»

The concept of the «geomagnetic pseudo storm» effect is introduced and discussed in the paper. The approach to evaluation of a number of its physical parameters is also proposed.

Key words: geomagnetic field, geomagnetic variations, magnetic storms, geomagnetic pseudo storm.