

## ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОМАГНИТНОЙ ПСЕВДОБУРИ, ВОЗНИКАЮЩЕЙ В ПРОЦЕССЕ АВИАПЕРЕЛЕТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ РАЗЛИЧНОГО ЦЕЛЕВОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Г. В. Миловзоров<sup>1</sup>, А. В. Воробьев<sup>2</sup>, Г. Р. Шакирова<sup>3</sup>, Э. А. Кильметов<sup>4</sup>

<sup>1</sup> gvmilovzorov@mail.ru, <sup>2</sup> cpu8bit@yandex.ru, <sup>3</sup> gulya\_shakirova@mail.ru, <sup>4</sup> kilmetovea@mail.ru

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Ижевский государственный технический университет им. М. Т. Калашникова» (ИжГТУ)

<sup>2-4</sup> ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 4 апреля 2014 г.*

**Аннотация.** Исследуются и анализируются амплитудно-частотные характеристики геомагнитной псевдобури, возникающей в условиях полета воздушных судов различного целевого назначения, на примере гражданского пассажирского самолета Boeing 767-300, выполняющего рейс AA937: Нью-Йорк (JFK) – Рио-де-Жанейро (RIO). Предлагается подход к автоматизации расчета параметров геомагнитной псевдобури, построенный на базе картографических веб-сервисов.

**Ключевые слова:** геомагнитные вариации; геомагнитные псевдобури; геомагнитное поле; электромгнитная совместимость.

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 приспособляться к изменениям окружающей магнитной обстановки (посредством деформации, мутации и т. п.), либо продолжать

существовать в ней в стрессовом (неустойчивом) режиме [1].

Особенно остро проблема минимизации негативного воздействия ГМВ стоит в области построения и эксплуатации аэрокосмической техники различного целевого назначения. Такая ситуация первоначально обусловлена взаимодействием человека со значительным количеством сложных навигационных, информационно-измерительных и управляющих систем в условиях непрерывности процесса полета и удаленности от наземных технических служб.

Учитывая известную статистику аварийных ситуаций, возникавших на борту летательных аппаратов, имеем, что большинство из них связаны с человеческим фактором – 57 % и/или отказом бортового оборудования – 22 %. Сопоставляя этот факт с преимущественно негативным, непредсказуемым и малоизученным воздействием ГМВ как на технические, так и на биологические объекты и системы [2–6], справедливо предположить, что детальное исследование ГМВ (в том числе геомагнитных псевдобурь), а также синтез способов и алгоритмов их минимизации может способствовать как повышению отказоустойчивости бортовой аппаратуры в частности, так

и повышению уровня безопасности полета в целом.

Таким образом, в ходе исследований, результаты которых приведены в настоящей статье, авторы ставили перед собой задачу выявления амплитудно-частотного диапазона эффекта геомагнитной псевдобури, его анализ, сравнение с аналогичными параметрами известных ГМВ естественной природы происхождения и формирования выводов о необходимости минимизации эффекта геомагнитной псевдобури, возникающей в процессе авиaperелета воздушных судов различного целевого назначения.

### 1. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЕГО ВАРИАЦИЙ

В настоящее время задача исследования и анализа параметров ГМВ частично решается посредством сети магнитных обсерваторий, преимущественно расположенных на Европы.

Публикуемые учеными-специалистами результаты исследований по данной тематике во

многом отражают амплитудный диапазон, характер и динамику изменения параметров геомагнитного поля в однозначно заданной точке земной поверхности, определенной географическими координатами (широта, долгота, высота над уровнем моря). При этом остается неясным, насколько существенное воздействие на объект (как биологической, так и техногенной 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 геомагнитного поля (рис. 1).

В работах [7–8] вводится понятие эффекта геомагнитной псевдобури (geomagnetic pseudostorm), под которым понимается силовое воздействие на объект со стороны геомагнитного поля (в том числе биологической природы происхождения), возникающее в объеме существования этого объекта в среде невозмущенного анизотропного геомагнитного поля при условии ненулевой угловой и/или линейной скоростей объекта.

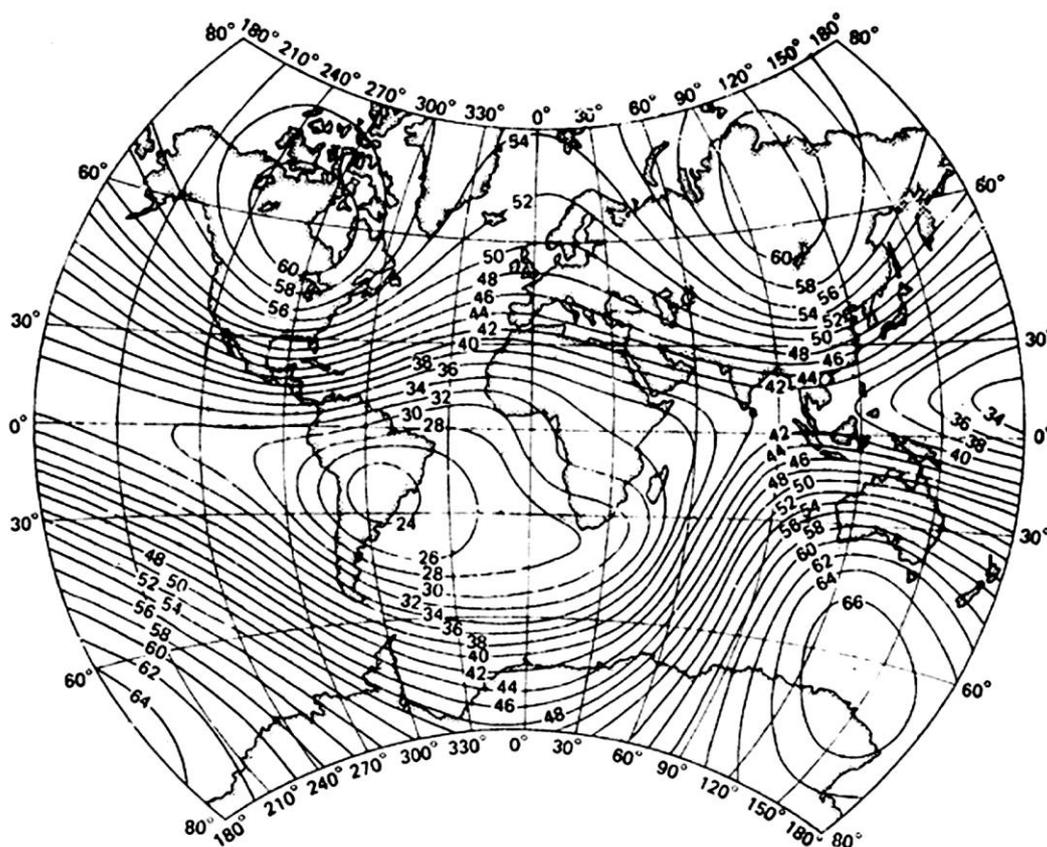


Рис. 1. Распределение главного магнитного поля по поверхности Земли и в околоземном пространстве

В связи с этим приоритетной научной задачей описываемых в настоящей статье исследований является определение, анализ и оценка основных параметров так называемых частных ГМВ, имеющих место в условиях объективно невозмущенного состояния геомагнитного поля, наблюдаемых в процессе авиaperелета воздушных судов различного целевого назначения.

## 2. ИНТУИТИВНЫЙ ОБРАЗ ГЕОМАГНИТНОЙ ПСЕВДОБУРИ

Для наглядной 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 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 при ненулевой линейной и угловой скоростей 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, находящиеся в анизотропном магнитном поле, с целью формализации такого рода воздействий, предлагается 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.

## 3. 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 ГМП внутреземных источников;  $\mathbf{B}_2$  – регулярная составляющая век-

тора индукции ГМП магнитосферных токов, вычисляемая в солнечно-магнитосферной системе координат;  $\mathbf{B}_3$  – иррациональная составляющая вектора индукции ГМП магнитосферных токов.

Магнитное поле внутреземных источников  $\mathbf{B}_1$  отражает преимущественно силовые характеристики невозмущенного геомагнитного поля, порождаемого главным образом электрических токов в земном ядре (главное поле) и составляющего ~ 98 % всего поля. Поля же земного магнетизма, обусловленные 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.

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 %.

В таком случае скалярный потенциал индукции геомагнитного диполя внутреземных источников  $U$  [нТл·км], в точке пространства со сферическими координатами  $r, \theta, \lambda$  определится согласно выражению:

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

где  $r$  – расстояние от центра Земли до точки наблюдения (геоцентрическое расстояние), км;  $\lambda$  – долгота от Гринвичского меридиана, градусы;  $\theta$  – полярный угол (дополнение до широты,  $\theta = (\pi/2) - \varphi'$ , градусы, где  $\varphi'$  – 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  $m$  [7–8].

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

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

где  $\varepsilon_m$  – 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.

### 3. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

В качестве примера рассмотрим самолет Boeing 767-300 авиакомпании American Airlines, выполняющий рейс AA937: Нью-Йорк (JFK) – Рио-де-Жанейро (RIO). Приближенная траектория движения самолета представлена на рис. 2.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента, отражающие изменение магнитного поля на борту самолета Boeing 767-300, выполняющего рейс AA-973. Данные получены с помощью специально разработанного авторами программного-инструментального комплекса, подробно описанного в [9–10], и регистрируются на протяжении всего полета через каждые 9 минут (540 секунд).

На рис. 3 приведено графическое отображение экспериментальных данных, отражающих динамику развития ГМПБ (рис. 3, а), а также результаты частотного анализа (рис. 3, б). При этом обозначен ряд замечательных точек:  $t_1$ – $t_2$  – время набора высоты;  $t_2$ – $t_4$  – время полета на крейсерской скорости;  $t_4$ – $t_5$  – время посадки;  $t_3$  – момент перехода через экватор.

Анализ рис. 3, а также сопоставление амплитудно-частотных характеристик наблюдаемой ГМПБ с аналогичными параметрами традиционных ГМВ [11], позволил сделать вывод о том, что эффект ГМПБ превосходит ГМВ как по амплитуде, так и по частоте в среднем на 2 порядка.

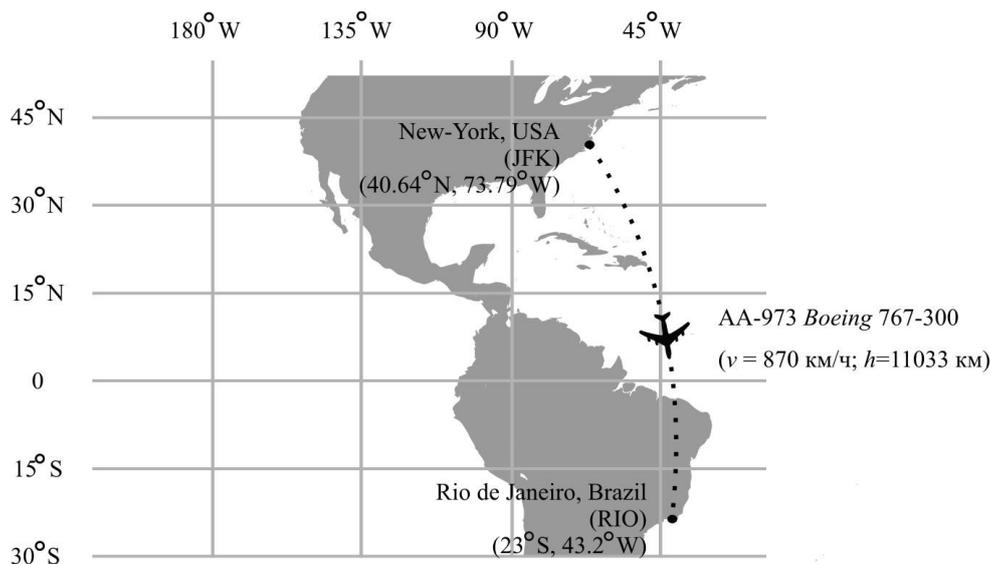


Рис. 2. Траектория полета Boeing 767-300, выполняющего рейс AA973

Таблица 1

## Экспериментальные данные

№	Широта	Долгота	Высота метр/фут	$B_x$ , нТл	$B_y$ , нТл	$B_z$ , нТл	$B$ , нТл
1.	40.63° N	73.77° W	2/6	23781	-4665	47771	53566
2.	40.07° N	73.22° W	01981/6500	23955	-4776	47181	53129
3.	39.85° N	73.02° W	02682/8800	24023	-4815	46952	52960
4.	39.58° N	72.76° W	3840/12600	24102	-4866	46658	52740
5.	39.22° N	72.39° W	4633/15200	24211	-4940	46275	52459
6.	38.87° N	72.01° W	6400/21000	24302	-5011	42871	52152
7.	38.49° N	71.71° W	7254/23800	24418	-5069	45480	51869
8.	38.02° N	71.24° W	9754/32000	24534	-5154	44934	51454
9.	37.71° N	70.96° W	10698/35100	24619	-5206	44594	51204
10.	37.34° N	70.54° W	10942/35900	24723	-5286	44182	50904
11.	36.80° N	70.10° W	11033/36200	24885	-5371	43625	50510
12.	36.40° N	69.71° W	11033/36200	24998	-5445	43191	50200
13.	35.86° N	69.18° W	11033/36200	25147	-5543	42598	49776
14.	35.06° N	68.50° W	11033/36200	25365	-5667	41734	49165
15.	34.37° N	67.90° W	11033/36200	25544	-5773	40973	48627
16.	33.97° N	67.57° W	11033/36200	25645	-5831	40532	48317
17.	32.61° N	66.52° W	11033/36200	25978	-6011	39032	47270
18.	31.89° N	65.95° W	11033/36200	26142	-6106	38220	46706
19.	30.95° N	65.13° W	11033/36200	26342	-6239	37124	45945
20.	29.83° N	64.43° W	11033/36200	26582	-6354	35888	45110
21.	28.60° N	63.53° W	11033/36200	26821	-6497	34471	44157
22.	27.97° N	63.05° W	11033/36200	26936	-6572	33733	43665
23.	26.78° N	62.30° W	11033/36200	27150	-6693	32379	42783
24.	26.36° N	61.99° W	11033/36200	27221	-6742	31883	42461
25.	25.95° N	61.71° W	11033/36200	27289	-6787	31405	42154
26.	25.15° N	61.20° W	11033/36200	27418	-6870	30480	41569
27.	24.47° N	60.78° W	11033/36200	27524	-6940	29694	41079
28.	23.62° N	60.19° W	11033/36200	27649	-7037	28684	40457
29.	22.97° N	59.82° W	11033/36200	27741	-7102	27937	40006
30.	22.32° N	59.49° W	11033/36200	27830	-7162	27201	39569
31.	21.71° N	59.14° W	11033/36000	27909	-7225	26494	39154
32.	20.71° N	58.50° W	11033/36000	28029	-7339	25303	38467
33.	19.86° N	58.04° W	11033/36000	28123	-7426	24316	37912
34.	18.99° N	57.53° W	11033/36000	28211	-7523	23285	37345
35.	18.22° N	57.18° W	11033/36000	28279	-7597	22408	36872
36.	17.26° N	56.72° W	11033/36000	28351	-7693	21300	36286
37.	14.49° N	55.29° W	11033/36000	28473	-7992	18023	34633
38.	13.55° N	54.85° W	11033/36000	28480	-8089	16917	34099
39.	12.55° N	54.30° W	11033/36000	28467	-8201	15699	33527
40.	11.58° N	53.93° W	11033/36000	28426	-8287	14585	33007
41.	10.41° N	53.45° W	11033/36000	28346	-8393	13222	32384
42.	09.42° N	52.98° W	11033/36000	28250	-8487	12035	31858
43.	08.64° N	52.70° W	11033/36000	28152	-8547	11143	31460
44.	07.31° N	52.10° W	11033/36000	27946	-8657	9560	30779
45.	06.44° N	51.67° W	11033/36000	27782	-8729	8507	30338
46.	05.43° N	51.31° W	11033/36000	27559	-8788	7359	29849
47.	04.14° N	50.83° W	11033/36000	27229	-8855	5892	29223
48.	02.89° N	50.37° W	11033/36000	26861	-8906	4488	28652
49.	01.75° N	49.91° W	11033/36000	26483	-8945	3202	28136
50.	00.65° N	49.56° W	11033/36000	26085	-8961	2031	27656
51.	02.14° S	48.59° W	11033/36000	24935	-8956	-879	26509
52.	04.55° S	47.91° W	11033/36000	23819	-8874	-3158	25614
53.	05.93° S	47.43° W	11033/36000	23134	-8809	-4437	25149
54.	07.81° S	46.90° W	11033/36000	22178	-8682	-6019	24565
55.	09.55° S	45.33° W	11033/36000	21165	-8607	-7916	24179
56.	11.49° S	45.84° W	11033/36000	20258	-8352	-8793	23611
57.	14.32° S	45.14° W	11033/36000	18806	-8031	-10569	23019
58.	19.30° S	43.98° W	9754/32000	16387	-7387	-13094	22238
59.	20.09° S	43.89° W	8534/28000	16036	-7279	-13408	22134
60.	20.46° S	43.76° W	7010/23000	15868	-7236	-13590	22110
61.	20.91° S	43.71° W	5974/19600	15673	-7175	-13762	22057
62.	21.48° S	43.58° W	4572/15000	15421	-7101	-13998	22004
63.	21.97° S	43.54° W	3078/10100	15215	-7035	-14173	21957
64.	22.90° S	43.21° W	396/1300	14800	-6920	-14578	21896

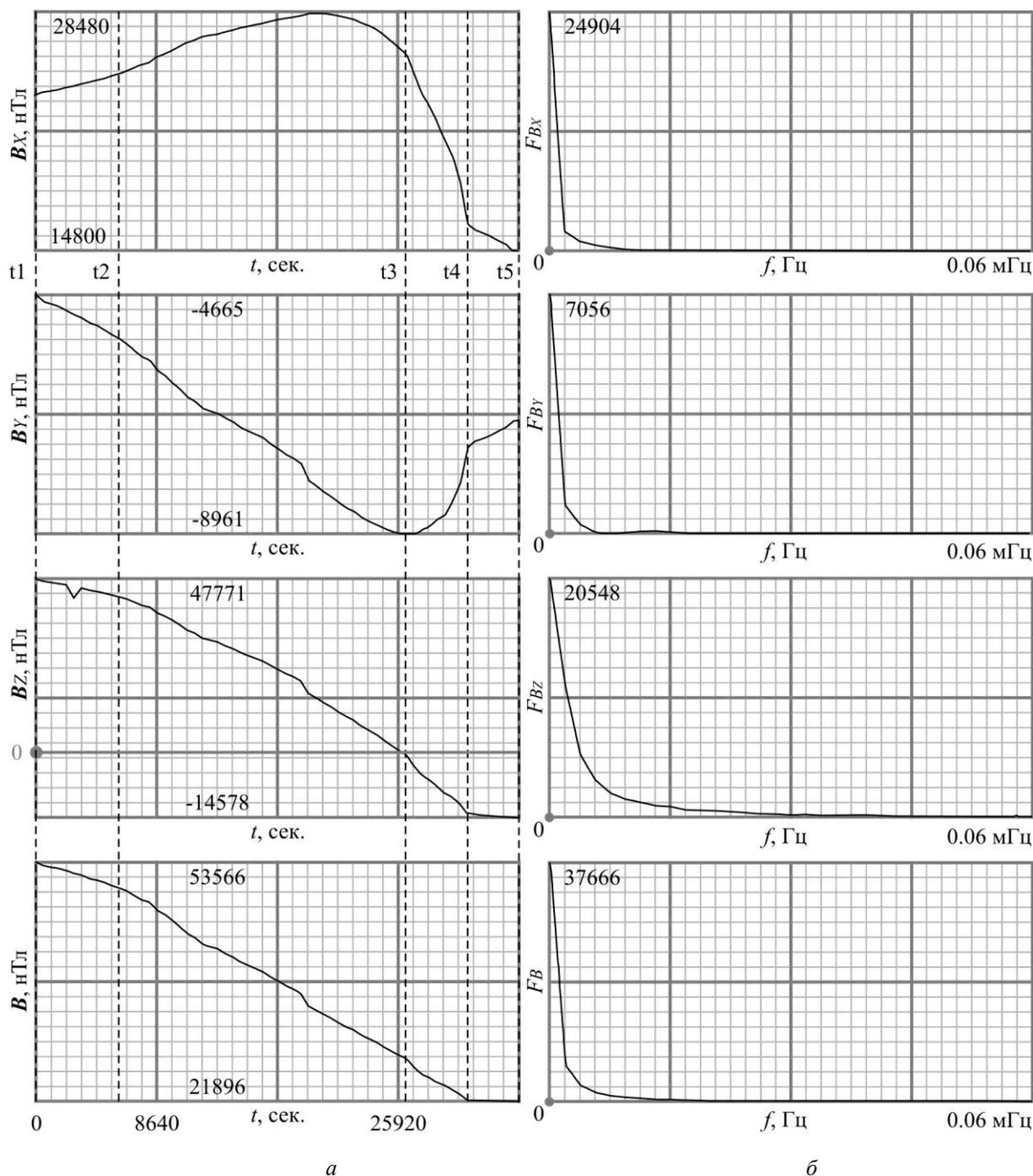


Рис. 3. Результат амплитудно-частотного анализа эффекта ГМПБ

Очевидно, что параметры ГМПБ непосредственно зависят как от региона полета воздушного судна, так и от его летно-технических характеристик (табл. 2). Таким образом, было установлено, что амплитудно-частотный диапазон ГМПБ ограничивается значениями 0–70000 нТл по амплитуде и 0–3 мГц по частоте, что как минимум на 3 порядка превосходит традиционные ГМВ.

Рассматривая же металлический (дюралюминиевый) фюзеляж летательного аппарата как проводник в переменном магнитном поле, согласно известным положениям Максвелла [12], на борту воздушного судна будет иметь место электромагнитное поле определенной частоты и амплитуды, возбужденное эффектом ГМПБ.

Таблица 2  
**Летно-технические характеристики самолетов  
 различного целевого назначения**

Тип самолета	Практический потолок, км	Крейсерская скорость, км/ч	Максимальная скорость, км/ч
Ил-96	12000	870	910
Boeing 767-300	12800	870	910
A 350-800	13100	903	945
A 380-800	13115	900	1020
F-15	20000	917	2650
Миг-31	20600	2500	3000
Миг-25	23000	3000	3325
X-43A	30000	–	11230

Так, принимая во внимание ранжировку электромагнитных волн, принятую Международным союзом электросвязи (International Telecommunication Union, ITU), нижний диапазон частот которой ограничен 3 Гц и обозначен как «крайне низкий диапазон частот» (ELF), имеет смысл его расширение областью 0–3 Гц, называемой «субкрайне низкий диапазон частот» (SELF).

#### 4. ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГЕОМАГНИТНОЙ ПСЕВДОБУРИ НА БАЗЕ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ВЕБ-СЕРВИСОВ

Автоматизация расчета параметров ГМП предполагает разработку приложения, функциональные возможности которого позволяют, с одной стороны, визуализировать картографические данные, а с другой – выполнять аналитические операции над ними.

Очевидным решением задачи разработки приложения является применение принципов сервис-ориентированной архитектуры (Service Oriented Architecture, SOA), сочетающего в себе набор веб-сервисов (интерфейса типа «программа-программа») и средств их подключения.

Центральным элементом такого решения является применение прикладного программного интерфейса (API) картографических веб-сервисов [13]. Под картографическим сервисом понимается способ предоставления веб-доступа к картографической информации на основе интерфейсов прикладного программирования. Наибольшей популярностью среди известных картографических сервисов является программный интерфейс Google Maps API (текущая версия проекта – v.3). Google Maps API – это бесплатный веб-сервис, предоставляющий набор служебных программ для управления картами

и добавления на них различной аналитической информации.

В рамках сервис-ориентированной архитектуры указанное приложение есть сочетание картографических сервисов и клиентских / серверных сценариев, обрабатывающих геоданные. Картографические сервисы отвечают за визуализацию карты, а также соединение полилинией начальной и конечной точек. Сценарии предназначены для обработки геоданных и расчета параметров ГМПБ на всем протяжении полета.

*Геодезическая полилиния.* Соединение двух точек пространства на карте Google Maps является хорошо известной и давно решенной задачей. Особенность ее реализации для построения воздушных маршрутов состоит в том, что Google Maps API предоставляет средства автоматического формирования маршрута только для наземных путей (автомобильных, велосипедных, пешеходных). Для визуализации и построения маршрутов остальных типов единственным решением является формирование так называемой геодезической полилинии.

Интерфейс Google Maps API формирует двумерные и плоские изображения. Однако, общеизвестно, что форма Земли наиболее точно характеризуется как эллипсоид. В этой связи изображение земной поверхности в двумерных проекциях подвергается деформациям, реализованных в сферическом приближении или проекции. Ввиду этих искажений аналитические операции с точками земной поверхности (вычисление расстояния, направления и площади) не могут быть выполнены по законам евклидовой геометрии. В этой связи для решения аналитических задач для эллипсоида общепринятым является подход, основанный на принципах сферической геометрии.

Согласно правилам сферической геометрии, между двумя точками сферы можно провести так называемый большой круг (Great Circle), разделенный на две дуги. Известно, что авиатранспорт всегда использует маршрут минимального расстояния между точками для экономии топлива. Полет осуществляется по расстоянию большого круга, что на плоскости выглядит как дуга.

Кратчайшее расстояние между двумя точками на земной поверхности (с заданными координатами широты и долготы) определяется как длина наименьшей дуги большого круга. Это расстояние, измеренное вдоль линии, соединяющей две точки (ортодромии) и проходящей по поверхности Земли (как сферы или эллипсоида), называется *геодезической полилинией*.

Интерфейс Google Maps трактует полилинию как набор соединенных друг с другом отрезков, который может быть задан набором точек с определенными координатами широты и долготы. Это обычные прямые на плоскости, подчиняющиеся законам евклидовой геометрии. В отличие от классической полилинии, представленной набором соединенных друг с другом прямых, геодезическая полилиния учитывает особенности сферического (эллиптического) представления земной поверхности.

*Разбиение геодезической полилинии на произвольное число отрезков.* Геодезическую полилинию можно задать всего двумя точками – начальной и конечной. Именно такая ситуация чаще всего имеет место при построении маршрута авиаперелета при использовании Google Maps API.

Массив точек полилинии (в том числе и геодезической) формируется на этапе ее построения. Иными словами, если нужно получить массив, содержащий более двух точек полилинии (а именно – начальной и конечной), то их следует задать еще на этапе ее построения. Конструктору полилинии должны быть переданы все необходимые для построения точки.

Однако зачастую невозможно получить требуемое количество точек полилинии по маршруту полета между пунктами взлета и приземления. Политика картографических сервисов такова, что координаты маршрута полета получить программным путем невозможно. Единственный выход – построить траекторию полета на Google Maps и выписать вручную координаты с заданным интервалом, которые доступны при наведении курсора мыши на соответствующую точку земного пространства. Безусловно, такое получение данных не является оптимальным и целесообразным.

Возникает актуальная задача: построить геодезическую полилинию по начальной и конечной точкам, а затем разбить ее на произвольное множество промежуточных точек. Известный алгоритм разбиения геодезической полилинии на составляющие предполагает выполнение трех операций: 1) перевода начальной и конечной координат в радианы, 2) вычисление расстояния между точками с помощью формулы гаверсинусов, 3) формирования массива координат полилинии.

*Перевод градусов в радианы.* Для того чтобы можно было использовать функции сферической геометрии, целесообразно перевести градусы в радианы. Преобразование координат в градусах в координаты в радианах выполняется по известной формуле:

$$A_d = A_r \cdot 180/\pi,$$

где  $A_d$  – координаты в градусах,  $A_r$  – координаты в радианах.

*Формула гаверсинусов* (Haversine formula, гаверсинус – haversinus, сокращение от half the versed sine – редко используемая тригонометрическая функция). Разбиение геодезической полилинии на множество отрезков предполагает предварительный расчет длины всей полилинии. Наиболее распространенным методом определения этого расстояния является формула гаверсинусов, которая часто используется в навигации<sup>1</sup>. Важно, что для вычисления расстояния этим методом не требуется выполнять проекционные преобразования (переводить географические координаты в прямоугольную систему координат).

Вычисление расстояния между двумя точками по формуле гаверсинусов имеет следующий вид:

$$a = \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} + \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \cdot \sin^2 \frac{\Delta\lambda}{2};$$

$$c = 2a \tan 2(\sqrt{a}, \sqrt{1-a});$$

$$d = R \cdot c.$$

где  $\phi$  – широта,  $\lambda$  – долгота,  $R$  – радиус Земли.

*Формирование массива координат полилинии.* Алгоритм формирования массива координат полилинии предполагает выполнение следующих действий:

- определение интервалов для разбиения полилинии – числа точек, которые должны быть представлены на полилинии;
- расчет трехмерных декартовых координат для каждой точки полилинии;
- преобразование трехмерных координат точек в двумерные координаты широты и долготы;
- занесение данных в массив.

*Клиентский сценарий.* Для реализации представленного алгоритма используется известный сценарий на языке JavaScript. Дополнительным доводом в пользу языка JavaScript является его полнофункциональная поддержка сервисами Google Maps. Другой немаловажной причиной является дальнейшее развитие веб-приложения в область асинхронного взаимодействия с веб-сервером по актуальной на сегодняшний день технологии AJAX, в которой главенствующее положение также отводится клиентским сценариям, а именно – языку JavaScript [14]. В пользу языка JavaScript также выступают его низкие

<sup>1</sup> В 1984 г. было установлено, что формула гаверсинусов полезна не только для наземной навигации, но и для астрономических расчетов.

требования к аппаратным и программным платформам, а требования к серверной программной компоненте аппаратно-программного комплекса и вовсе сводятся к минимуму.

*Серверный сценарий.* Анализ параметров ГМПБ реализуется на уровне серверного сценария, написанного на языке PHP. Функциональные возможности языка серверных сценариев предоставляют возможности для реализации формул расчета параметров геомагнитного поля в точке с заданными координатами широты и долготы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании результатов исследований, представленных в настоящей статье, справедливо сделать заключение о том, что ГМПБ не только имеют место в процессе авиаперелетов воздушных судов различного целевого назначения, но и обладают значениями амплитуды и частоты, на несколько порядков превосходящими амплитудно-частотные параметры ГМВ естественной природы происхождения.

Такое положение дел представляет целесообразным расширением традиционной ранжировки электромагнитных волн, принятой Международным союзом электросвязи (International Telecommunication Union, ITU), диапазоном 0–3 Гц, который предлагается именовать как «субкрайненизкий диапазон частот» (SELF).

При этом актуальная проблема нейтрализации (экранирования) преимущественно негативного воздействия ГМПБ на биологические и технические объекты и системы, находящиеся на борту воздушных судов, на сегодняшний день является нерешенной и весьма малоизученной, что ставит перед современной промышленностью ряд новых сложных научно-технических задач.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Воробьев А. В.** Вопросы проектирования цифровых геомагнитных обсерваторий. Berlin: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. 133 с. [ A. V. Vorobev, *Problems of digital geomagnetic observatories development* (in Russian). Berlin: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2012. ]
2. **Чижевский А. Л.** Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с. [ A. L. Chizhevsky, *Earth echo of sun storms*, (in Russian). Moscow: Mysl, 1976. ]
3. **Вернадский В. И.** Биосфера и ноосфера. М.: Айрис Пресс, 2004. 261 с. [ V. I. Vernadsky, *Biosphere and noosphere*, (in Russian). Moscow: Airis Press, 2004. ]
4. **Бинги В. Н., Савин А. В.** Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // УФН. 2003. Т. 173, № 3. С. 265–269. [ V. N. Bingi, A. V. Savin, "Physical problems of weak geomagnetic fields on biological systems," (in Russian), *UFN*, vol. 173, no. 3, pp. 265-269, 2003. ]
5. **Понаморенко Г. Н.** Электромагнитотерапия и светолечение. СПб.: Мир и семья, 1995. С. 150–153. [ G. N. Ponomarenko, *Elektromagnetotherapy and phototherapy*, (in Russian). St.-Petersburg: Mir I semiya, 1995. ]
6. **Гурфинкель Ю. И. и др.** Влияние геомагнитных возмущения на капиллярный кровоток у больных ишемической болезнью сердца // Биофизика. 1995. Т. 40, вып. 4. С. 793–799. [ Yu. I. Gurphinkel, et al., "An influence of geomagnetic variations on capillary blood flow in patients with coronary heart disease," (in Russian), *Biofizika*, vol. 40, no. 4, pp. 793-799, 1995. ]
7. **Воробьев А. В.** Моделирование и исследование эффекта геомагнитной псевдодури // Геоинформатика. 2013. № 1. С. 29–36. [ A. V. Vorobev, "Modeling and analyses of geomagnetic pseudostorm effect," (in Russian), *Geoinformatica*, no. 1, pp. 29-36, 2013. ]
8. **Миловзоров Г. В., Воробьев А. В., Миловзоров Д. Г.** Методика описания параметров геомагнитной псевдодури // Вестник ИжГТУ. 2013. № 1. С. 103–107. [ G. V. Milovzorov, A. V. Vorobev, D. G. Milovzorov, "Methodics of geomagnetic pseudostorm parameters description," (in Russian), *Vestnik IzhGTU*, no. 1, pp. 103-107, 2013. ]
9. **Воробьев А. В.** Способ определения параметров невозмущенного геомагнитного поля в полевых условиях // Нефтегазовое дело. 2013. № 1. С. 71–80. [ A. V. Vorobev, "Method of undisturbed geomagnetic field detection," (in Russian), *Neftegazovoe delo*, no. 1, pp. 71-80, 2013. ]
10. **Воробьев А. В.** GEOmagnetic\_v1.0: Св-во об офиц. регистрации программы для ЭВМ № 2013610905. М.: Роспатент, 2013. [ A. V. Vorobev, *Geomagnetic\_v1.0*, Certificate of official registration of program № 2013610905, Moscow: Rospatent, 2013. ]
11. **Воробьев А. В.** О возможности применения анизотропных магниторезистивных сенсоров в геоинформационных магнитометрических системах // Приборы. 2012. № 1 (139). С. 10–16. [ A. V. Vorobev, "The possibility of using anisotropic magnetoresistive sensors in geographic magnetometric information systems," (in Russian), *Prybory*, no. 1 (139), pp. 10-16, 2012. ]
12. **Воробьев А. В.** Магнитные материалы и элементы электронных устройств. Уфа: УГАТУ, 2012. 154 с [ A. V. Vorobev, *Magnetic materials and elements of electronic devices*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2012. ]
13. **Воробьев А. В., Шакирова Г. Р.** Автоматизированный анализ невозмущенного геомагнитного поля на основе технологий картографических веб-сервисов // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 5 (58). С. 177–187. [ A. V. Vorobev, G. R. Shakirova, "Automated analyses of undisturbed geomagnetic field on the basis of map web services," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 5 (58), pp. 177-187, 2013. ]
14. **Vorobev A. V., Shakirova G. R., Galiev B. R.** The undisturbed geomagnetic field parameters determining programming tool on the basis of Google maps technology // CSIT'2013. Vol. 2. P. 119–125. [ A. V. Vorobev, G. R. Shakirova, "The undisturbed geomagnetic field parameters determining programming tool on the basis of Google maps technology," in *Proc. CSIT'2013*, vol. 2, pp. 119-125, 2013. ]

## ОБ АВТОРАХ

**МИЛОВЗОРОВ Георгий Владимирович**, проф. каф. прибор и методов контроля качества ИжГТУ. Дипл. инж. по инф.-измер. технике (УГАТУ, 1978). Д-р. техн. наук по инф.-изм. и упр. системам (1998) Иссл. в обл. геоинформ. магнитометрич. систем.

**ВОРОБЬЕВ Андрей Владимирович**, доц. каф. электроники и биомедицинских технологий, вед. науч. сотр. каф. АСУ. М-р по электронике и микроэлектронике (УГАТУ, 2006). Канд. техн. наук по инф.-изм. и упр. системам (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. геоинформ. магнитометрич. систем.

**ШАКИРОВА Гульнара Равилевна**, доц. каф. АСУ. Дипл. инж.-системотехник (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по мат. и прогр. обеспечению выч. машин, комплексов и комп. сетей (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. иерархич. моделей, сит. управления, веб-технологий.

**КИЛЬМЕТОВ Эрнест Айдарович**, асп. каф. теор. основ электротехники. Дипл. инж. по электронике и микроэлектронике (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. геоинформ. магнитометрич. систем.

## METADATA

**Title:** Research and analyses of amplitude-frequency characteristics of geomagnetic pseudostorm during the aircraft of any type.

**Authors:** G. V. Milovzorov<sup>1</sup>, A. V. Vorobev<sup>2</sup>, G. R. Shakirova<sup>3</sup>, E. A. Kilmotov<sup>4</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Izhevsk State Technical University (UzhGTU), Russia.

<sup>2-4</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>gvmilovzorov@mail.ru, <sup>2</sup>cpu8bit@yandex.ru, <sup>3</sup>gulya\_shakirova@mail.ru, <sup>4</sup>kilmotovea@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 3 (64), pp. 132-141, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper is concerned with research and analysis of amplitude-frequency characteristics of geomagnetic pseudostorm effect, which appears during any aircraft flight. The gained results are discussed on example of civil airline Boeing 767-300 and its flight AA937 "New York – Rio de Janeiro".

**Key words:** electromagnetic compatibility; geomagnetic variations; geomagnetic pseudostorm; geomagnetic field.

**About authors:**

**MILOVZOROV, Geogiy Vladimirovich**, Prof., Dept. of instrumentation and quality control methods IzhGTU. Dipl. Engineer on information measuring instrumentation (UGATU, 1978). Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 1998).

**VOROBEV, Andrey Vladimirovich**, Assoc. Prof., Dept. of Electronics and Biomedical Technologies, Dept. of Automated Systems. Master of Electronics & Microelectronics (UGATU, 2006). PhD (UGATU, 2009).

**SHAKIROVA, Gulnara Ravilevna**, Assoc. Prof., Dept. of Automated Systems. Dipl. Engineer on Automated Management Systems (UGATU, 2005). PhD (UGATU, 2008).

**KILMETOV, Ernest Aidarovich**, Postgrad. (PhD), Dept. of Theoretical Foundations of Electrical Engineering. Dipl. Engineer on Electronics & Microelectronics (UGATU, 2013).