

УДК 004.65:550.384.5

© А.В. Воробьев, Г.Р. Шакирова

А.В. Воробьев, Г.Р. Шакирова

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗА ПЕРИОД 2010-2015 ГГ.

Введение

В настоящее время учеными и специалистами различных профилей особое внимание уделяется изучению динамики параметров геомагнитного поля (ГМП) в целом, а также ГМП внутриземных источников и геомагнитного диполя в частности. В первую очередь такой интерес обусловлен актуальной проблемой исследования и прогнозирования динамики смещения полюсов ГМП и моделирования его возможных последствий [1].

Традиционно полный вектор индукции ГМП, наблюдаемый в любой точке географического пространства, однозначно заданный пространственно-временными координатами (широта, долгота, высота над уровнем моря и год), рассматривается как сумма двух составляющих [2-3]:

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

где \mathbf{B}_1 – вектор индукции ГМП внутриземных источников; \mathbf{B}_2 – регулярная составляющая вектора индукции ГМП магнитосферных токов, вычисляемая в солнечно-магнитосферной системе координат.

Известно, что ГМП внутриземных источников, обусловленное полем электрических токов в земном ядре (главное поле), составляет ~98% всего поля, а поле земного магнетизма горных пород – ~2%. При этом поле земной коры убывает с высотой значительно быстрее, чем главное поле, и начиная с высоты ~100 км им практически пренебрегают [4].

Вместе с тем магнитное поле магнитосферных токов описывает регулярную составляющую геомагнитосферы, зависит от параметров межпланетной среды и отражает известное сжатие магнитосферы Земли на дневной стороне из-за взаимодействия с солнечным ветром, асимметрию «день-ночь» (поле на ночной стороне ослаблено), суточные, сезонные, годовые и прочие периодические вариации поля [5].

Математическое, методическое и алгоритмическое обеспечение расчета параметров геомагнитного поля внутриземных источников

Решая задачу аналитической оценки параметров \mathbf{B}_1 , модель главного поля обычно представляют

рядами сферических гармоник как функцию от географических координат.

Так, скалярный потенциал индукции ГМП внутриземных источников U [нТл·км] в точке пространства со сферическими координатами r, θ, λ определяется выражением (1):

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

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 – средний радиус Земли, $R_3 = 6371,03$ км; $g_n^m(t), h_n^m(t)$ – сферические гармонические коэффициенты, (нТл) (табл. 1-2 и 3-4 для эпох 2010 и 2015 соответственно), зависящие от времени; P_n^m – нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра степени n , порядка m [6-8].

Выражение (1) широко известно как ряд Гаусса и общепризнанно в качестве международного эталона невозмущенного состояния ГМП [9-10]. При этом вопрос об оптимальной длине сферического гармонического ряда на сегодняшний день остается открытым. Чтобы выяснить значение членов высоких порядков, Г. Фанзелау вычислил коэффициенты g_n^m и h_n^m до 15-го порядка, В. Колесова и Э. Кропачев – до 23-го порядка. Основное, что следует из анализа этих данных, – это резкое уменьшение всех коэффициентов для 6–8-го порядков и затем медленное убывание их с некоторыми колебаниями. Однако ни у одного коэффициента, вплоть до 23-го порядка, нет резкого увеличения, что указывало бы на источники магнитного поля локального характера.

Анализ результатов расчета с большим числом членов подтверждает предположение Гаусса о сходимости сферического гармонического ряда, представляющего геомагнитный потенциал. Обычно при сферических гармонических анализах ряды ограничиваются 8-10 членами. Однако при достаточно однородных и высокоточных исходных данных,

Таблица 1

Матрица коэффициентов $g_{n,0}^m$, нТл (для эпохи 2010)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-29496,5	-1585,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2396,6	3026,0	1668,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1339,7	-2326,3	1231,7	634,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
912,6	809,0	166,6	-357,1	89,7	0	0	0	0	0	0	0	0
-231,1	357,2	200,3	-141,2	-163,1	-7,7	0	0	0	0	0	0	0
72,8	68,6	76,0	-141,4	-22,9	13,1	-77,9	0	0	0	0	0	0
80,4	-75,0	-4,7	45,3	14,0	10,4	1,6	4,9	0	0	0	0	0
24,3	8,2	-14,5	-5,7	-19,3	11,6	10,9	-14,1	-3,7	0	0	0	0
5,4	9,4	3,4	-5,3	3,1	-12,4	-0,8	8,4	-8,4	-10,1	0	0	0
-2,0	-6,3	0,9	-1,1	-0,2	2,5	-0,3	2,2	3,1	-1,0	-2,8	0	0
3,0	-1,5	-2,1	1,6	-0,5	0,5	-0,8	0,4	1,8	0,2	0,8	3,8	0
-2,1	-0,2	0,3	1,0	-0,7	0,9	-0,1	0,5	-0,4	-0,4	0,2	-0,8	0

Таблица 2

Матрица коэффициентов $h_{n,0}^m$, нТл (для эпохи 2010)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	4945,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-2707,7	-575,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-160,5	251,7	-536,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	286,4	-211,2	164,4	-309,2	0	0	0	0	0	0	0	0
0	44,7	188,9	-118,1	0,1	100,9	0	0	0	0	0	0	0
0	-20,8	44,2	61,5	-66,3	3,1	54,9	0	0	0	0	0	0
0	-57,8	-21,2	6,6	24,9	7,0	-27,7	-3,4	0	0	0	0	0
0	10,9	-20,0	11,9	-17,4	16,7	7,1	-10,8	1,7	0	0	0	0
0	-20,5	11,6	12,8	-7,2	-7,4	8,0	2,2	-6,1	7,0	0	0	0
0	2,8	-0,1	4,7	4,4	-7,2	-1,0	-4,0	-2,0	-2,0	-8,3	0	0
0	0,1	1,7	-0,6	-1,8	0,9	-0,4	-2,5	-1,3	-2,1	-1,9	-1,8	0
0	-0,8	0,3	2,2	-2,5	0,5	0,6	0,0	0,1	0,3	-0,9	-0,2	0,8

Таблица 3

Матрица коэффициентов $g_{n,0}^m$, нТл (для эпохи 2015)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-29438,5	-1501,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2445,3	3012,5	1676,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1351,1	-2352,3	1225,6	581,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0
907,2	813,7	120,3	-335,0	70,3	0	0	0	0	0	0	0	0
-232,6	360,1	192,4	-141,0	-157,4	4,3	0	0	0	0	0	0	0
69,5	67,4	72,8	-129,8	-29,0	13,2	-70,9	0	0	0	0	0	0
81,6	-76,1	-6,8	51,9	15,0	9,3	-2,8	6,7	0	0	0	0	0
24,0	8,6	-16,9	-3,2	-20,6	13,3	11,7	-16,0	-2,0	0	0	0	0
5,4	8,8	3,1	-3,1	0,6	-13,3	-0,1	8,7	-9,1	-10,5	0	0	0
-1,9	-6,5	0,2	0,6	-0,6	1,7	-0,7	2,1	2,3	-1,8	-3,6	0	0
3,1	-1,5	-2,3	2,1	-0,9	0,6	-0,7	0,2	1,7	-0,2	0,4	3,5	0
-2,0	-0,3	0,4	1,3	-0,9	0,9	0,1	0,5	-0,4	-0,4	0,2	-0,9	0

Таблица 4

Матрица коэффициентов $h^m_{n,0}$, нТл (для эпохи 2015)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	4796,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-2845,6	-642,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-115,3	245,0	-538,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	283,4	-188,6	180,9	-329,5	0	0	0	0	0	0	0	0
0	47,4	196,9	-119,4	16,1	100,1	0	0	0	0	0	0	0
0	-20,7	33,2	58,8	-66,5	7,3	62,5	0	0	0	0	0	0
0	-54,1	-19,4	5,6	24,4	3,3	-27,5	-2,3	0	0	0	0	0
0	10,2	-18,1	13,2	-14,6	16,2	5,7	-9,1	2,2	0	0	0	0
0	-21,6	10,8	11,7	-6,8	-6,9	7,8	1,0	-3,9	8,5	0	0	0
0	3,3	-0,3	4,6	4,4	-7,9	-0,6	-4,1	-2,8	-1,1	-8,7	0	0
0	-0,1	2,1	-0,7	-1,1	0,7	-0,2	-2,1	-1,5	-2,5	-2,0	-2,3	0
0	-1,0	0,5	1,8	-2,2	0,3	0,7	-0,1	0,3	0,2	-0,9	-0,2	0,7

например полученных со спутника, возможно продолжение рядов до 12 и 13 гармоник. Коэффициенты гармоник более высоких порядков по величине сравнимы или меньше погрешности определения коэффициентов. Так, к примеру, при длине ряда 11-13 гармоник погрешность вычисления ГМП на поверхности Земли не превышает 2%.

По причине временных вариаций главного поля коэффициенты гармонических рядов (сферические гармонические коэффициенты) периодически (раз в 5 лет) пересчитывают с учетом новых данных, получаемых со спутников и магнитных обсерваторий.

Изменения главного поля за один год, или так называемый вековой ход, также представляются рядами сферических гармоник (табл. 5-6 и 7-8 для эпох 2010 и 2015 соответственно).

Нормированные по Шмидту присоединенные функции Лежандра в выражении (1), представляют собой ортогональный многочлен, имеющий вид (2).

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

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

Здесь важно отметить, что в определенных научных задачах некоторые геопространственные данные (например, положение искусственных спутников Земли в пространстве) представляют в географических (геодезических) координатах φ, λ, h , основанных на аппроксимации поверхности Земли эллипсоидом вращения. Наряду с этим в задачах иного рода эллиптичностью Земли пренебрегают,

Таблица 5

Матрица коэффициентов g^m_n , нТл/год (для эпохи 2010)

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11,4	16,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-11,3	-3,9	2,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,3	-3,9	-2,9	-8,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-1,4	2,0	-8,9	4,4	-2,3	0	0	0	0	0	0	0	0
-0,5	0,5	-1,5	-0,7	1,3	1,4	0	0	0	0	0	0	0
-0,3	-0,3	-0,3	1,9	-1,6	-0,2	1,8	0	0	0	0	0	0
0,2	-0,1	-0,6	1,4	0,3	0,1	-0,8	0,4	0	0	0	0	0
-0,1	0,1	-0,5	0,3	-0,3	0,3	0,2	-0,5	0,2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

не делая разницы между сферическими и геодезическими координатами. Однако при проведении точных/эталонных расчетов учитывать полюсное сжатие Земли целесообразно и необходимо.

Учитывая такого рода сжатия, r и φ' будут вычисляться согласно выражениям (3) и (4) соответственно [11]:

$$r^2 = h^2 + 2h\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi} + \frac{a^4 \cos^2 \varphi + b^4 \sin^2 \varphi}{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \varphi' = \frac{b^2 + h\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}{a^2 + h\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}} \operatorname{tg} \varphi, \quad (4)$$

где φ – географическая (геодезическая) широта точки в пространстве, (градусы); h – высота точки над уровнем моря, (градусы); a – большая полуось земного эллипсоида вращения; b – малая полуось земного эллипсоида вращения.

Учитывая, что долготы λ в сферических и геодезических координатах тождественны, составляющие вектора индукции ГМП внутриземных источников X' , Y' , Z' в нТл определяются как:

$$X' = \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) \left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+2} \frac{\partial P_n^m \cos \theta}{\partial \theta},$$

$$Z' = \frac{\partial U}{\partial r} = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) \left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+2} P_n^m \cos \theta,$$

$$Z' = \frac{\partial U}{\partial r} = - \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (n+1) (g_n^m \cos(m\lambda) + h_n^m \sin(m\lambda)) \left(\frac{R_3}{r}\right)^{n+2} P_n^m \cos \theta.$$

Таким образом, в точке с координатами φ , λ , h прямоугольные составляющие вектора индукции (в геодезической системе координат) определяются согласно выражениям (5)–(8), а модуль вектора индукции ГМП – согласно формуле (9):

$$X = X' \cos(\varphi - \varphi') + Z' \sin(\varphi - \varphi'), \quad (5)$$

$$Y = Y', \quad (6)$$

$$Z = Z' \cos(\varphi - \varphi') + X' \sin(\varphi - \varphi'), \quad (7)$$

$$|H| = \sqrt{X^2 + Y^2}, \quad (8)$$

$$|B_1| = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (9)$$

где $|H|$ – горизонтальная составляющая вектора индукции ГМП B_1 (проекция B_1 на горизонтальную плоскость XY).

Следует отметить, что значения элемента поля Y в выражении (6) для точки пространства при $\theta = 0$ обычно получают линейной интерполяцией.

Угловые элементы геомагнитного диполя определим из следующих соотношений:

$$D = \arctg(Y/X); \quad I = \arcsin(Z/|B_1|),$$

где D – магнитное склонение, т. е. угол между географическим и магнитным меридианами (положительное к востоку); I – магнитное наклонение, т. е. угол

между горизонтальной плоскостью XY и вектором B_1 (положительное к востоку).

При расчете геомагнитных элементов на заданный год t сферические гармонические коэффициенты $g_n^m(t)$ и $h_n^m(t)$ пересчитываются в соответствии с выражениями (10) и (11) соответственно:

$$g_{n,t}^m = g_{n,t_0}^m + \underline{g}_n^m (t - t_0), \quad (10)$$

$$h_{n,t}^m = h_{n,t_0}^m + \underline{h}_n^m (t - t_0), \quad (11)$$

где t – текущий год; t_0 – год, на который известны сферические гармонические коэффициенты $g_n^m(t)$, $h_n^m(t)$; \underline{g}_n^m и \underline{h}_n^m – поправка на сферические гармонические коэффициенты, связанная с вековым ходом ГМП (табл. 5-6 и 7-8 для эпох 2010 и 2015 соответственно).

Модель дипольного ГМП соответствует полю, представленному первым членом сферических гармоник выражения (1). Так, составляющие дипольного ГМП определяются из формул:

$$X(r, \theta, \lambda) = \left[-g_1^0 \sin \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \cos \theta \right] \left(\frac{R_3}{r}\right)^3,$$

$$Y(r, \theta, \lambda) = \left[g_1^1 \sin \lambda - h_1^1 \cos \lambda \right] \left(\frac{R_3}{r}\right)^3,$$

$$Z(r, \theta, \lambda) = -2 \left[g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \theta \right] \left(\frac{R_3}{r}\right)^3.$$

Координаты полюсов дипольного поля (геомагнитных полюсов) и его магнитный момент M [Тл·м³] находятся из выражений (12), (13) и (14) соответственно.

$$\operatorname{tg} \Phi_0 = \frac{g_1^0}{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}, \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} A_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1}, \quad (13)$$

$$M = R_3^3 \sqrt{(g_1^0)^2 + (g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}. \quad (14)$$

где Φ_0 и A_0 – географическая широта и долгота геомагнитного полюса соответственно, (градусы).

На рис. 1, 2 представлены адаптированные для программной формализации методика и алгоритм расчета параметров ГМП и геомагнитного диполя. Описание и ход построения приведенных методик и алгоритмов детально рассматривался в [11].

На базе представленных методики и алгоритма с целью повышения эффективности расчета параметров ГМП был разработан программно-инструментальный комплекс GEOmagnetic_v1.0 (Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013610905. М.: РосАПО, 2013), позволяющий генерировать расчетные данные о состоянии параметров ГМП, а также осуществлять их геопространственную привязку в автоматизированном режиме с погрешностью, удовлетворяющей заявленной в ГОСТ 25645.126-85 «Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников» [2].

Моделирование, визуализация и анализ параметров ГМП за период 2010-2015 гг.

На рис. 3-4 в качестве примера представлен результат визуализации (в виде изолиний) результатов расчета параметров ГМП, полученных посредством программно-инструментального комплекса «GEOmagnetic_v1.0» для эпох 2010 и 2015 соответственно. Шаг изолиний как на рис. 3, 4 составляет 1000 нТл (1 мкТл), что предоставляет базу для суждений об их относительном смещении.

Интеграция разработанного инструментария с современными ГИС-технологиями [12-15] обеспечила возможность наглядно отображать динамику изменения параметров полного вектора ГМП внутриземных источников за период 2010-2015 гг. на одной графической подложке (рис. 5). Здесь пунктирной и сплошной линиями отмечено распределение параметров полного вектора ГМП внутриземных источников по состоянию на 2010 и 2015 гг. соответственно. Шаг изолиний в данном случае был задан как 2500 нТл (2,5 мкТл).

На рис. 6 представлен результат визуализации параметра ΔB_1 , определяемого в соответствии с выражением (15) и обеспечивающего базу для суждения о глобальном перераспределении полного вектора ГМП внутриземных источников.

$$\Delta B_1 = B_{1,2015} - B_{1,2010}$$

где $B_{1,2015}$ и $B_{1,2010}$ – значения вектора ГМП внутриземных источников по состоянию на 2010 и 2015 гг. соответственно.

Таким образом, очевидно, что за период 2010-2015 гг. перераспределение полного вектора ГМП внутриземных источников произошло таким образом, что в западном полушарии наблюдается его преимущественное ослабление ($\Delta B_{1,min} = -730,1$ нТл), а в восточном – усиление ($\Delta B_{1,max} = 567,2$ нТл). При этом экстремумы ослабления и усиления наблюдаются в северо-западной и юго-восточной областях планеты соответственно.

В табл. 9 приведены результаты расчета магнитного момента геомагнитного диполя, а также координаты его северного полюса, полученные в соответствии с выражениями (12)–(14).



Рис. 1. Методика расчета параметров невозмущенного ГМП

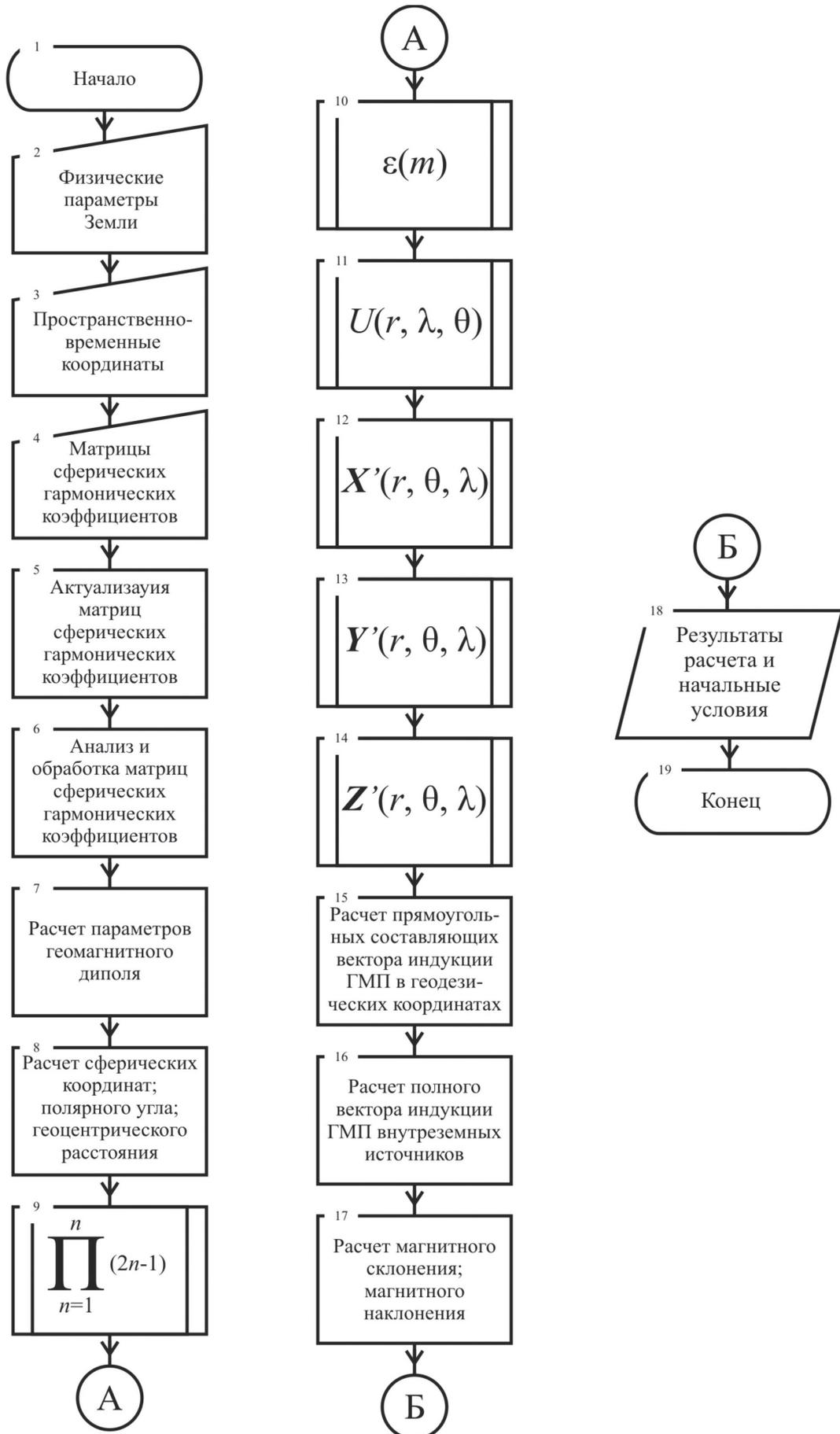


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров ГМП

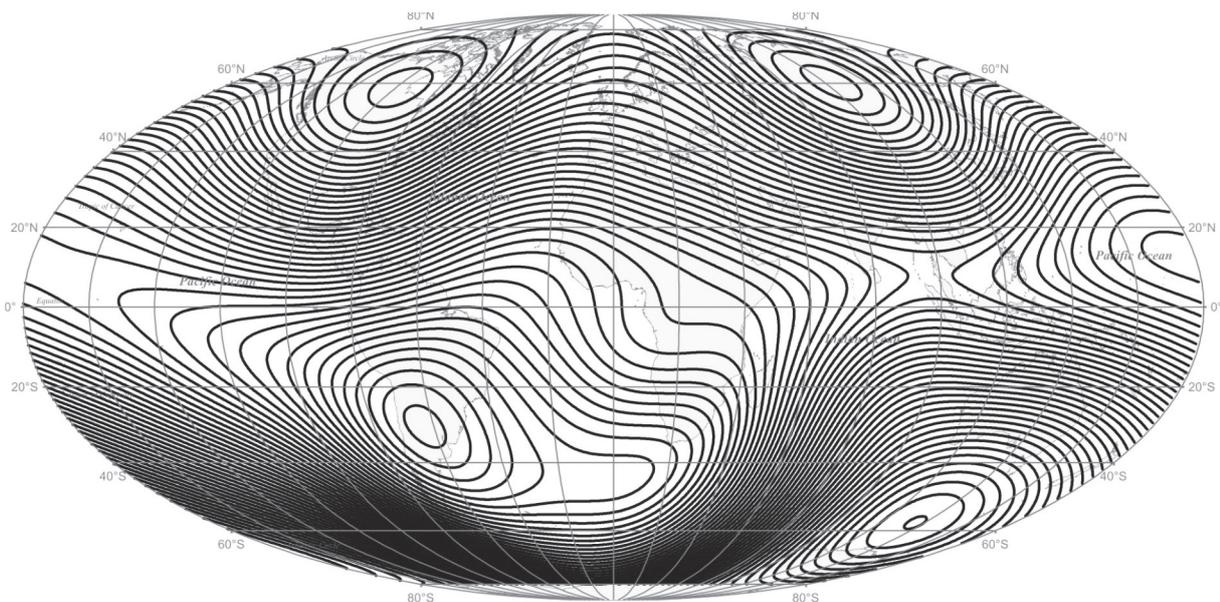


Рис. 3. Модель распределения полного вектора ГМП внутриземных источников для эпохи 2010

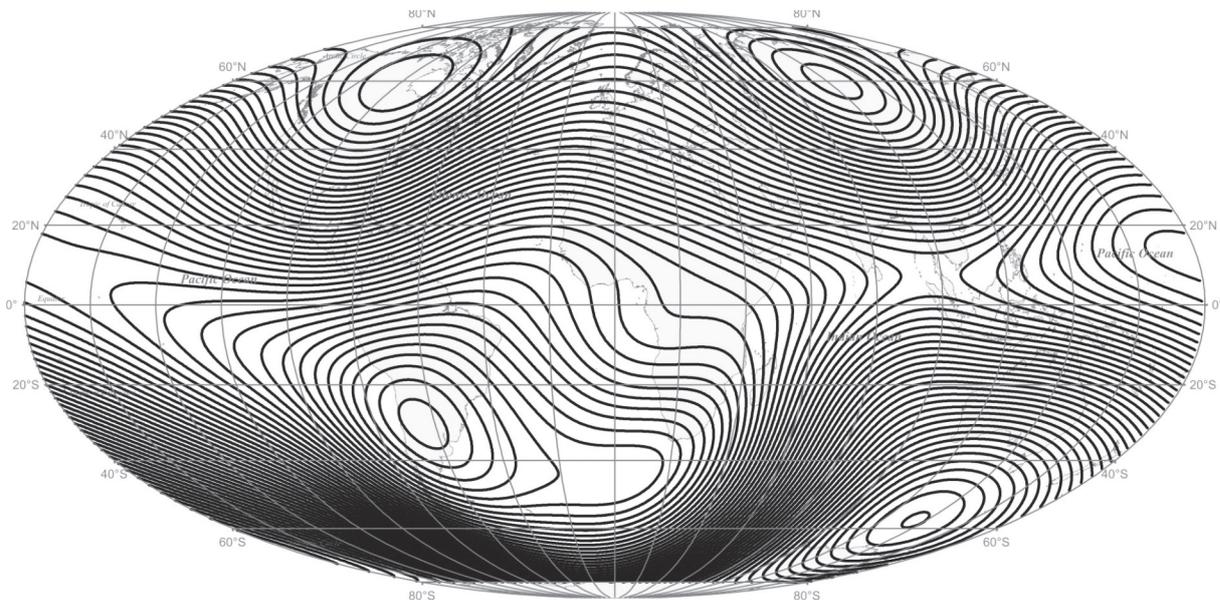


Рис. 4. Модель распределения полного вектора ГМП внутриземных источников для эпохи 2015

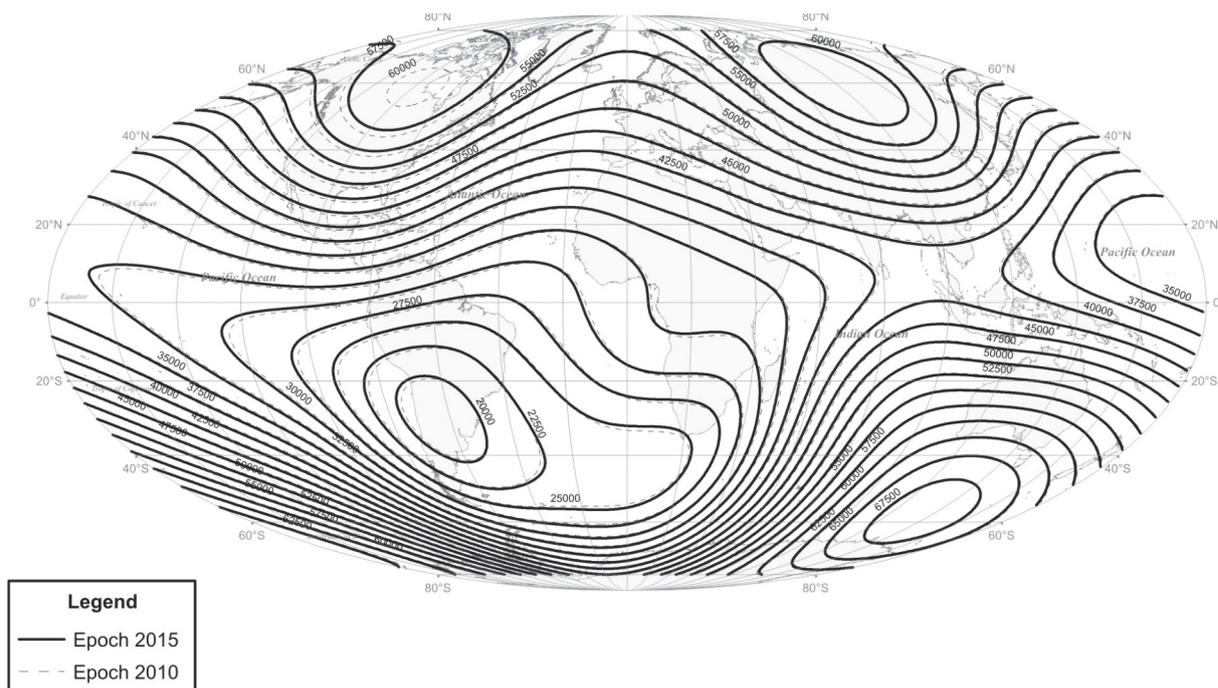


Рис. 5. Сравнение характера распределения полного вектора ГМП внутриземных источников для эпох 2010 и 2015

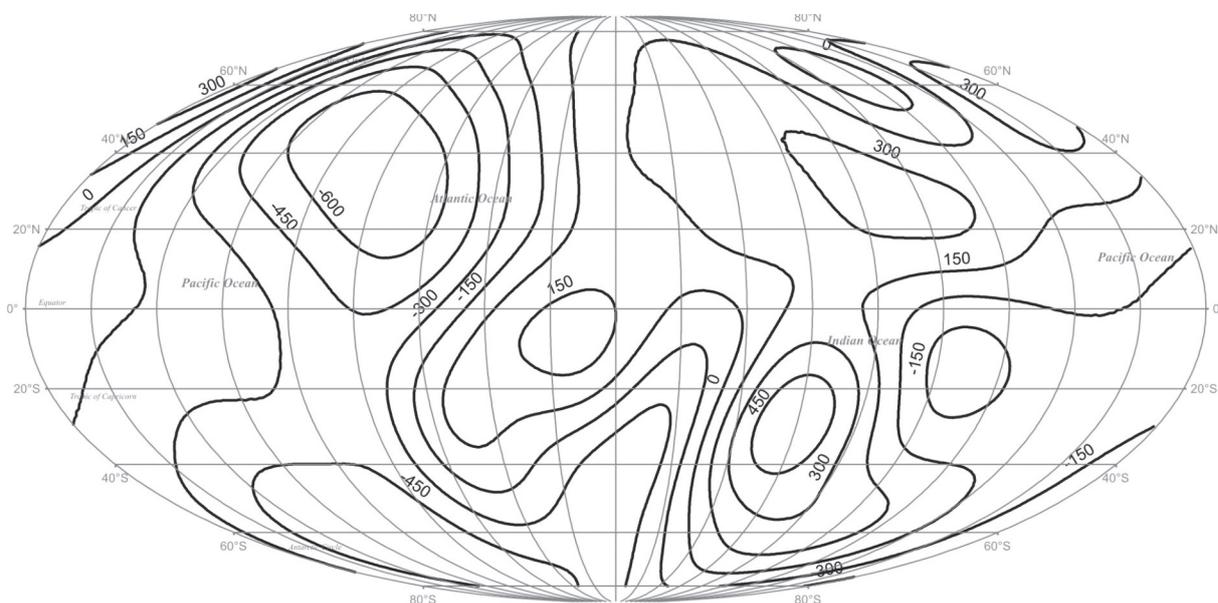


Рис. 6. Анализ приращения ГМП внутриземных источников за период с 2010-2015 гг.

Анализ данных, представленных в табл. 9, позволил сделать заключение о том, что за последние пять лет магнитный момент дипольного ГМП уменьшился на $2,218 \cdot 10^{13}$ Тл·м³, что составляет $\sim 0,286\%$, при этом северный магнитный полюс сместился из точки с координатами ($-80,015^\circ$ с.ш., $72,219^\circ$ в.д.) в точку с координатами ($-80,312^\circ$ с.ш., $-72,621^\circ$ в.д.),

что составляет $\sim 33,93$ км в южном (географическом) направлении.

Заклучение

Таким образом, расчет, моделирование и анализ динамики параметров ГМП внутриземных источников за период 2010-2015 гг. выявил:

Таблица 9

Расчетные данные основных параметров геомагнитного диполя

Параметр Эпоха	M, Тл·м ³	Φ_N , (градус с.ш.)	Λ_N , (градус в.д.)
2010	$7,745 \cdot 10^{15}$	-80,015	-72,219
2015	$7,723 \cdot 10^{15}$	-80,312	-72,621

- за указанный период перераспределение полного вектора ГМП внутриземных источников произошло таким образом, что в западном полушарии наблюдается его преимущественное ослабление ($\Delta B_{1_{\min}} = -730,1$ нТл), а в восточном – усиление ($\Delta B_{1_{\max}} = 567,2$ нТл);
 - за последние пять лет магнитный момент дипольного ГМП уменьшился на $2,218 \cdot 10^{13}$ Тл·м³, что составляет ~0,286%;
 - северный магнитный полюс сместился из точки с координатами (-80,015° с.ш., 72,219° в.д.) в точку с координатами (-80,312° с.ш., -72,621° в.д.), что составляет ~33,93 км в южном (географическом) направлении.
- Работа поддержана грантами РФФИ №№14-07-00260-а, 14-07-31344-мол-а.

Ключевые слова: геомагнитные вариации, геомагнитное поле, внутриземные источники.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ляхов А.Н., Зецер Ю.И., Фуллер-Ройелл Т. Возможные последствия смещения магнитных полюсов для структуры и динамики верхней атмосферы Земли // Доклады Академии наук, 2006. – Т. 409. – № 5. – С. 1-3.
2. ГОСТ 25645.127-85. Магнитосфера Земли. Модель магнитного поля магнитосферных токов. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
3. ГОСТ 25645.126-85. Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
4. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Pseudostorm effect: computer modelling, calculation and experiment analyzes // Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, Albena, Bulgaria, June 17-26, 2014, – Vol. 1. – P. 745-751 (Scopus, DOI: 10.5593/sgem2014B21).
5. Миловзоров Г.В., Воробьев А.В., Миловзоров Д.Г. Методика описания параметров геомагнитной псевдобури // Вестник ИжГТУ. – 2013. – № 1. – С. 103-107.
6. Патент на изобретение № 2526234. Способ комплексной оценки эффекта геомагнитной псевдобури / Воробьев А.В. – М.: РосАПО, 2014.
7. Миловзоров Г.В., Воробьев А.В., Шакирова Г.Р., Кильметов Э.А. Исследование и анализ амплитудно-частотных характеристик геомагнитной псевдобури, возникающей в процессе авиаперелета воздушных судов различного целевого назначения // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – №3 (64). – С. 132-141.
8. Воробьев А.В. Моделирование и исследование эффекта геомагнитной псевдобури // Геоинформатика. – 2013. – № 1. – С. 29-36.
9. Воробьев А.В., Шакирова Г.Р., Иванова Г.А., Попкова Е.Е. Анализ и исследование частных геомагнитных вариаций // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2.
10. Воробьев А.В. Вопросы проектирования цифровых геомагнитных обсерваторий: монография. LAP Lambert Academic Publishing G mbh & Co. KG, Berlin, – 2012. – 133 с.
11. Воробьев А.В. Способ определения параметров невозмущенного геомагнитного поля в полевых условиях // Нефтегазовое дело. – 2013. – № 1. – С. 71-80.
12. 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.
13. Vorobev A.V., Shakirova G.R. Geoinformation system of geomagnetic pseudostorm parameters registration and analysis // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18. – № 5(66). – С. 62-67.
14. Воробьев А.В., Шакирова Г.Р., Попкова Е.Е., Суворова В.А. GMPS-эффект как инновационный аспект при исследовании параметров магнитосферы Земли // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 9.
15. Воробьев А.В., Шакирова Г.Р., Попкова Е.Е., Суворова В.А. Вопросы построения геоинформационных систем на базе известных картографических веб-сервисов // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10. – № 2. – С. 10.