

УДК 550.389.3

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕВОЗМУЩЕННОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Воробьев А.В.

ФГБОУ ВПО Уфимский государственный нефтяной технический университет,
ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
e-mail: cpu8bit@yandex.ru

Аннотация. Предлагается способ определения и регистрации параметров невозмущенного (нормального) геомагнитного поля, в условиях минимума аппаратно-вычислительных средств и систем, (а также ограниченных информационных и энергоресурсов), обеспечивающих при этом оперативное и достоверное вычисление основного ряда параметров геомагнитного диполя в автоматическом режиме, в связи с чем, являющийся эффективным при использовании его в полевых условиях, как специалистами геофизического профиля, так и исследователями иных научных отраслей.

Ключевые слова: геомагнитное поле, геомагнитный диполь, геомагнитосфера.

На сегодняшний день задача оперативного определения и регистрации параметров невозмущенного геомагнитного поля (ГМП) в условиях минимума аппаратно-вычислительных средств (в полевых условиях), среди геологов, геофизиков и специалистов иного профиля стоит достаточно остро.

Данная ситуация связана с тем, что традиционно, на территории России, задача расчета параметров ГМП в полевых условиях решается по средствам либо периодически публикуемых справочников (например, такими организациями, как НП АГП «Меридиан+»), либо по средствам геофизического оборудования.

Известные и распространенные в геофизической практике подходы к оперативному определению достоверных параметров ГМП в условиях минимума аппаратно-вычислительных средств (в полевых условиях), имеют ряд значимых недостатков, а именно: жесткая привязка к шагу дискретизации заданной координатной сетки; низкая степень автоматизации процесса определения параметров ГМП; необходимость использования габаритного и дорогостоящего оборудования; малый ряд определяемых в результате параметров и др.

Таким образом, очевидно, что создание новых и совершенствование имеющихся и применяемых на практике способов эффективного определения параметров невозмущенного ГМП, в том числе в полевых условиях, является актуальной как научно-технической, так и естественнонаучной задачей.

Краткий обзор параметров ГМП и его вариаций

Широко известно, что непрерывное вращение Земли в целом, и ее ядра в частности обуславливает наличие в нем постоянных течений, и соответствующих им электрических токов, обеспечивающих в свою очередь, (согласно законам магнитной гидродинамики) наличие ГМП. При этом в силу сложной и неоднородной структуры геомагнитосферы (рисунок 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 ГМП на границе магнитосферы – магнитопаузе (рисунок 1) соответствует ~ 10.03 мТл, у поверхности Земли на экваторе $\sim 20\text{--}40$ мкТл, а у полюсов $\sim 60\text{--}70$ мкТл.

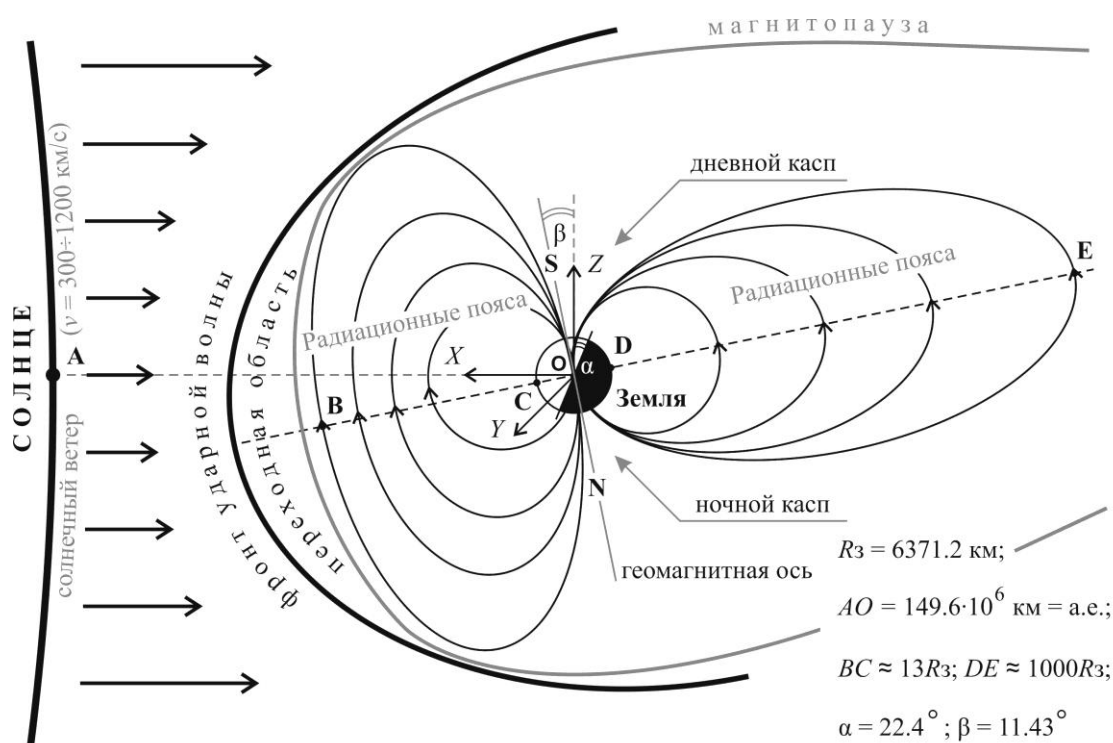


Рисунок 1. Структура геомагнитного поля

Анализируя известные данные, относительно амплитудно-частотных характеристик ГМВ, справедливо сделать заключение о том, что в большинстве случаев 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 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 настоящей статье обсуждаются результаты завершенных исследований, в ходе которых решались задачи синтеза математических, программно-алгоритмических и методических средств, в совокупности обеспечивающих автоматическое и оперативное определение ряда параметров невозмущенного ГМП в условиях минимума аппаратно-вычислительных средств (в том числе и в полевых условиях), а также варианта их практической реализации.

Здесь к расчету и регистрации предлагаются следующие параметры ГМП:

- географические координаты северного геомагнитного полюса;
- момент геомагнитного диполя;
- потенциал индукции ГМП внутриземных источников;
- северная составляющая вектора индукции ГМП;
- восточная составляющая вектора индукции ГМП;
- вертикальная составляющая вектора индукции ГМП;
- полный вектор магнитной индукции внутриземных источников;
- магнитное склонение и магнитное наклонение.

Математическое моделирование невозмущенного ГМП

Определим полный вектор индукции магнитного поля Земли \mathbf{B}_{ge} в точке географического пространства, заданной пространственно-временными координатами (широта, долгота, высота над уровнем моря, год), как сумму трех приоритетных составляющих:

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

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; \mathbf{B}_3 – иррациональная составляющая вектора индукции ГМП магнитосферных токов, в том числе и техногенной природы происхождения.

В качестве фундаментальной математической модели в настоящих исследованиях рассматривается выражение количественной оценки скалярного потенциала индукции ГМП внутриземных источников U , [нТл·км], в точке географического пространства со сферическими координатами r , θ , λ , определяемое как:

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

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]; $g_n^m(t)$ и $h_n^m(t)$ – сферические гармонические коэффициенты, [нТл], зависящие от времени; P_n^m – ортогональный многочлен нормированных по Шмидту присоединенных функций Лежандра [2] степени n , порядка m , определяемый согласно (2) [1].

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

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.

Отметим здесь, что в действительности, магнитное поле внутриземных источников состоит из поля электрических токов в земном ядре (главное поле), составляющего ~98 % всего поля и поля земного магнетизма горных пород, составляющего ~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.

В специализированной литературе выражение (1) широко известно как ряд Гаусса и помимо того, что согласно [1] широко используется для расчета индукции ГМП внутриземных источников, также является общепризнанным международным эталоном количественной оценки невозмущенного состояния магнитосферы Земли.

Таким образом, положим, что $\mathbf{B}_0 \approx \mathbf{B}_1$, где \mathbf{B}_0 – индукция невозмущенного ГМП в локальной пространственно-временной точке земной поверхности; \mathbf{B}_1 – индукция ГМП внутриземных источников.

Относительно сферических гармонических коэффициентов, известно, что при достаточно однородных и высокоточных исходных данных, какие, например, получают при спутниковых съемках, возможно получение рядов до 12 и 13 гармоник. Коэффициенты же гармоник более высоких порядков по величине сопоставимы или меньше погрешности определения этих коэффициентов [3].

Так, в настоящих исследованиях использовалась длина ряда в 12 гармоник, при этом погрешность вычисления ГМП у поверхности Земли согласно [1] не превышает 2 %. Другими словами, согласно обозначенным допущениям, составляющая ГМП $\mathbf{B}_1 \approx \mathbf{B}_0$ отражает силовые характеристики невозмущенного ГМП с точностью не менее 98 %, что считаем удовлетворительным и достаточным для наблюдения и анализа распределения индукции ГМП в

околоземном пространстве и формирования соответствующих расчетных массивов и выводов.

На рисунке 2 представлена методика расчета основных параметров ГМП и географических координат геомагнитного диполя, на базе которой, в среде *Scilab* 5.3.2 реализован экспериментальный программно-алгоритмического комплекс «*GEOmagnetic_v1.0*», обеспечивающий автоматизированное вычисление основных параметров невозмущенного ГМП по заданным пространственно-временным координатам.

Дальнейшее сопоставление данных, полученных в результате обработки программно-методического комплекса «*GEOmagnetic_v1.0*», с аналогичной информацией, периодически публикуемой Национальным управлением океанических и атмосферных исследований (*National Oceanic and Atmospheric Administration «NOAA»*), г. Роквилл (*Rockville*), США (*USA*) «*NOAA*», принимаемой здесь за эталонное значение, выявило, что разница между вычисленными и опубликованными «*NOAA*» данными, не превышает 0,2 %, что в рамках рассматриваемой проблематики предлагается считать удовлетворительным.



Рисунок 2. Методика расчета параметров невозмущенного ГМП

Результат работы программно-методического комплекса «*GEOMagnetic_v1.0*» в консольном режиме для тестовой 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 [4].

Листинг 1. Результат работы экспериментального ПО «GEOmagnetic_v1.0»

*****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]: 54.81000

Восточная долгота (географические координаты), [градусы]: 56.10000

Высота над уровнем моря, [км]: $h=0.11500$

год 2014

***Расчет сферических координат и полярного угла:

Долгота (сферические координаты), [рад]: $\lambda=0.97913$

Широта (сферические координаты), [рад]: $\varphi_{sh}=0.95344828$

Полярный угол, [рад]: $\theta=0.61734805$

Геоцентрическое расстояние, [км]: $r(h)=6364.06338$

***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]: $M=7702417517722451.0$

***Расчет параметров вектора геомагнитной индукции внутриземных источников:

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

$U=-158990882.05657676$

Северная составляющая вектора индукции ГМП, [нТл]: $V_x=15872.09720$

Восточная составляющая вектора индукции ГМП, [нТл]: $V_y=3817.99693$

Вертикальная составляющая вектора индукции ГМП, [нТл]: $V_z=52234.93558$

Полный вектор магнитной индукции внутриземных источников, [нТл]:
 $V=54726.49326950$

Магнитное склонение - угол между географическим и магнитным меридианом
(положительное к востоку), [градусы]: $D=13.52540$

Магнитное наклонение - угол между горизонтальной плоскостью h_x и направлением
вектора V (положительное при направлении вектора V вниз), [градусы]: $I=72.64455$

Задаваясь далее планетарной матрицей высот (таблица 1), обеспечивается информационная база для построения (с необходимым разрешением) «карты-массива» количественной оценки распределения вектора геомагнитной индукции внутриземных источников B_0 (или, опционально, карты распределения изолиний магнитной индукции ГМП) по поверхности Земли и в околоземном пространстве с учетом топографических особенностей исследуемой местности (таблица 2).

Таблица 1 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 2. Карта планетарного распределения параметра B_0 , мкТл

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	57,4	56,8	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	54,5	51,4	49,7	50,2	56,5	59,6	61,2	55,5	52,7
40° с.ш.	44,1	51,5	55,3	49,7	43,3	43,0	46,1	50,9	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	44,7	42,7	35,3	32,9
0°(экватор)	32,3	31,2	30,5	28,1	28,5	32,8	36,7	38,2	43,1	41,6	38,1	34,7
20° ю.ш.	37,0	30,6	24,1	20,2	24,4	28,8	29,6	39,8	51,9	52,9	60,3	55,4
40° ю.ш.	47,1	38,6	26,9	19,2	22,4	23,4	26,7	42,2	57,9	64,5	62,5	64,0
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	60,8
80° ю.ш.	59,1	55,6	50,1	45,8	42,9	43,4	47,1	52,4	56,8	59,6	60,8	44,0

В более общем случае, по средствам программно-методического обеспечения *GEOmagnetic_v1.0* массивы, аналогичные таблице 2 возможно автоматически синтезировать как для оценки глобальной планетарной околоземной геомагнитной обстановки, так и для исследования регионального распределения вектора геомагнитной индукции внутриземных источников в заданном статическом временном интервале, либо в динамическом режиме.

Таким образом, ученым-специалистам предоставляется возможность оперативно и с надлежащей точностью генерировать и анализировать картины распределения вектора геомагнитной индукции в околоземном пространстве с любой необходимой разрешающей способностью в автоматизированном режиме.

Подход к практической реализации способа определения параметров невозмущенного ГМП в полевых условиях

Отметим, что реализация предложенного программно-методического комплекса на платформе стандартных ПК или в виде *Internet*-приложения уже в определенной степени решает поставленную в рамках настоящих исследований задачу.

Однако, с целью повышения эффективности обсуждаемого способа, здесь предлагается реализация экспериментального программно-методического комплекса «*GEOmagnetic_v1.0*», адаптированная к одной из распространенных среди коммуникаторов, планшетных компьютеров и прочих подобных портативных устройств операционных систем:

- Android ;
- iOS;
- Windows phone и т.п.,

как показано на рисунке 3.

Подобный подход очевидно обеспечит расширение функциональных возможностей и повысит автономность и оперативность проводимых исследований и сопутствующих им расчетов, как специалистами геофизического профиля, работающими в полевых условиях – в частности, так и обладателями оговоренных портативных устройств с соответствующим программным обеспечением – в целом.

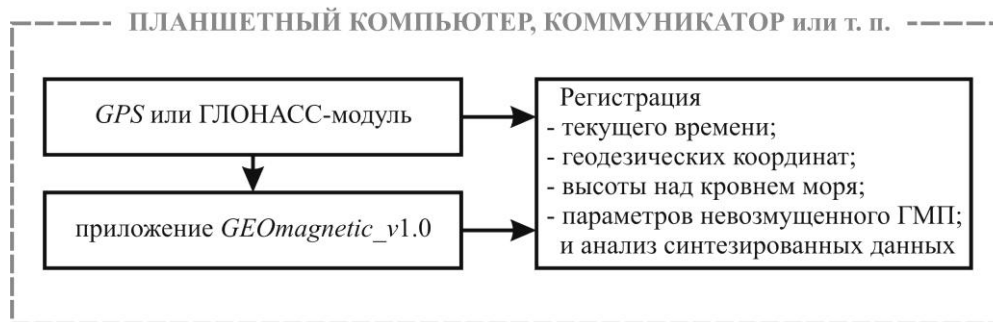


Рисунок 3. Структура способа определения параметров невозмущенного ГМП

При этом, учитывая, что большинство обозначенных портативных устройств-носителей программно-методического комплекса «*GEOMagnetic_v1.0*» обладают интегрированными *GPS* или ГЛОНАСС-модулями, автоматизацию процесса вычисления параметров ГМП в текущей точке нахождения исследователя, возможно приблизить непосредственно к 100 %, вероятность же совершения оператором устройства методической ошибки наоборот – свести к абсолютному минимуму.

Заключение и выводы

Таким образом, в рамках проведенных исследований синтезирован, научно обоснован и предложен как способ, обеспечивающий оперативное, автоматическое определение ряда параметров невозмущенного ГМП в условиях минимума аппаратно-вычислительных средств (в том числе и в полевых условиях), так и вариант его конкретной практической реализации. При этом, результаты расчета параметров невозмущенного ГМП и сопутствующих величин по настоящему способу разнятся с эталонными значениями не более чем на 0,2 %.

Литература

1. ГОСТ 25645.126-85 Поле геомагнитное. Модель поля внутриземных источников. М.: изд-во стандартов, 1990. 21 с.
2. Пантелеев В.Л. Теория фигуры Земли. М.: изд-во МГУ, 2000. 98 с.
3. Яновский Б. М. Земной магнетизм. Л.: изд-во Ленинградского ун-та, 1978. 592 с.
4. *GEOMagnetic_v1.0* Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2013610905. М.: РосАПО, 2013.

METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS UNPERTURBED GEOMAGNETIC FIELD

A.V. Vorobyov

FSBEI Ufa state petroleum technical university,

FSBEI Ufa state aviation technical university

e-mail: cpu8bit@yandex.ru

Abstract. Provides a method of determining and recording the undisturbed (normal) of the geomagnetic field in the minimum hardware and computational tools and systems, as well as the limited information and energy resources, while ensuring the efficiency and reliability of the calculation of the basic series parameters of the geomagnetic dipole in the automatic mode, in connection with which, is effective when used in the field, as experts geophysical profiles and researchers and other scientific fields.

Keywords: geomagnetic field, geomagnetic dipole, geomagnitosfera

References

1. GOST 25645.126-85 Pole geomagnitnoe. Model polya vnutrizemnih istochnikov. M.: Izdatelstvo standartov, 1990. 21 p.
2. Panteleev V.L. Teoriya figuri Zemli. M.: Izdatelstvo MGU, 2000. 98 p.
3. Yanovskiy B.M. Zemnoy magnetism. Leningrad.: Izdatelstvo leningradskogo universiteta, 1978. 592 p.
4. *GEOMagnetic_v1.0* Svidetelstvo ob oficialnoy registracii programmi dla EVM №2013610905. M.: RosAPO, 2013.

Сведения об авторе

Воробьев А. В., канд. техн. наук, доцент, кафедры «Автоматизация

производственных процессов», ФГБОУ ВПО УГНТУ, ФГБОУ ВПО УГАТУ

A. V. Vorobyov, cand. tech. sci., associate professor, department of "Automation of production processes," FSBEI USPTU, FSBEI USATU

e.mail: cpu8bit@yandex.ru