

УДК 550.382

М.І. Орлюк, А.В. Марченко, М.І. Бакаржієва

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, м. Київ

КУРСЬКА МАГНІТНА АНОМАЛІЯ: АНАЛІЗ АНОМАЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗА ДАНИМИ НАЗЕМНИХ, СТРАТОСФЕРНИХ І СУПУТНИКОВИХ ЗЙОМОК

Узагальнено всі наявні картографічні матеріали щодо геомагнітного поля району Курської магнітної аномалії (КМА). Проаналізовано характер аномального магнітного поля (ΔT_a) на земній поверхні, висоті 5 і 30 км та супутникових висотах. Окремі аномалії КМА мають на поверхні інтенсивність від -6000 до $15\,000$ нТл, на висоті 5 км – від -1500 до 3500 нТл. Інтенсивність аномалії за даними стратосферних і супутникових спостережень становить: на висоті 30 км – 1200 нТл, а на висоті 400 км – 14 нТл.

Ключові слова: Курська магнітна аномалія, геомагнітне поле, магнітна модель.

Вступ. Курська магнітна аномалія (КМА) є однією з найінтенсивніших аномалій на планеті, яка зафіксована як на поверхні, так і на супутникових висотах. Природу КМА пов’язують з одним із найбільших у світі басейнів з покладами багатих залізних руд, розташованих у межах Белгородської, а також Курської і Орловської областей Росії, частково – в районі Сумської та Харківської областей України.

Історія відкриття КМА пов’язана з незвичайною поведінкою магнітної стрілки поблизу м. Курськ. Вперше на це явище звернув увагу відомий учений-астроном академік П.Б. Іноходцев у 1773 р. Керуючи роботами з визначення географічного положення міст центральної частини Європейської Росії, він виявив у районі міст Белгород і Курськ сильну аномалію поля земного магнетизму. Більш ніж через 100 років вдруге на загадку КМА натрапив приват-доцент Казанського університету І.М. Смирнов, коли проводив у 1874 р. перше геомагнітне знімання європейської частини Росії. У 1883 р. приват-доцент Харківського університету М.Д. Пільчиков здійснив серію спостережень у районі КМА, за результатами яких було виявлено нові райони аномалії, а також вказана їх природа – поклади залізної руди.

На теперішній час у зв’язку з дослідженням природи окремих аномалій гостро постало питання ідентифікації їх внутрішніх і зовнішніх дже-

рел у сумарному полі, заміряному на супутникових висотах. Щодо КМА є багато робіт, де окремо проаналізовано аномальне магнітне поле за результатами наземних, аеро- та супутникових зніманих. Крім того, є роботи, в яких цю аномалію виділено за супутниковими даними без кількісного аналізу зіставлення з результатами наземних зніманих, що призводить часто до можливих спекуляцій щодо її форми та інтенсивності. Тому в запропонованій статті розглянуто наявні картографічні матеріали та виконано попередній аналіз аномального магнітного поля ΔT району КМА і прилеглих територій за даними наземних, стратосферних й супутникових зніманих, а також оцінено внесок корових джерел на різних висотах.

Картографічне забезпечення. Для території досліджень у зв'язку з фундаментальним і прикладним значенням КМА здійснено спостереження магнітного поля різної детальності на різних висотах, включно із супутниковими. На підставі цих зніманих розроблено карти масштабів 1 : 100 000, 1 : 200 000, 1 : 1 000 000, 1 : 2 500 000, 1 : 5 000 000 на поверхні Землі, 1 : 15 000 000 на висоті 5 км, а також позамасштабні карти на висотах польоту супутників [1, 3–5, 18 та ін.]. З використанням цих карт у результаті осереднення та перерахунку поля на різні висоти було зроблено декілька спроб виділити регіональну складову геомагнітного поля та оцінити затухання поля з висотою [2, 6, 7, 11]. Однак більш-менш повну картину щодо магнітного поля у верхньому півпросторі було отримано за результатами спостережень на висотах 9 та 30 [5, 15] і 350–800 км [12, 17, 19, 20].

Згідно з аналізом цих карт, на земній поверхні спостерігається сильно диференційоване магнітне поле з наявністю інтенсивних, витягнутих у північно-західному напрямку аномалій з поперечними розмірами в перші кілометри та інтенсивністю від $-10\,000$ до $15\,000$ нТл і більше, які для південно-західної частини регіону досліджень розміщуються на додатковому регіональному фоні, а для північно-західної – на від'ємному (рис. 1).

Загалом інтенсивні максимуми спостерігаються над залізородними пластами, з якими спряжені від'ємні аномалії. Неозброєним оком також видно наявність у спостереженому полі мінімум двох складових – локальної та регіональної.

На висоті польоту супутника MAGSAT (400 км) аномалія від КМА становить близько 15 нТл [17, 20], при цьому слід урахувувати, що частина її інтенсивності зумовлена суперпозиційним внеском інших джерел [7, 8],

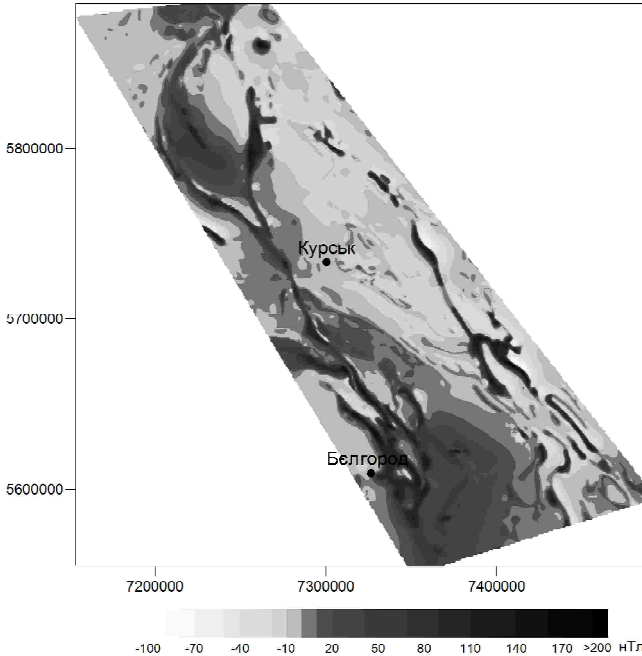


Рис. 1. Карта аномального магнітного поля (на висоті 100 м) [13]. Ізолінії поля проведені в 10^2 нТл

розташованих у межах Українського щита та Воронежського кристалічного масиву.

Для характеристики поля досліджуваного регіону ми модифікували карту аномального магнітного поля Землі на висоті 5 км [18]. Згідно з розробленою цифровою картою, аномальне магнітне поле на висоті 5 км змінюється в широких межах: від -2000 до 8000 нТл (рис. 2).

Для аналізу особливостей поля регіонального та локального характеру ми виконали осереднення вихідного поля (представленого за мережею 5×5 км) коміркою з розмірами 100×100 км. Таке згладжене поле, в якому відображені тільки його регіональні особливості, показано на рис. 3, а. Як видно з рисунку регіональна компонента поля сформована кількома окремими максимумами інтенсивністю до 6000 нТл, які з'єднуються у смугу північно-західного простягання специфічної форми типу “шахового коня”. Інтенсивність пов'язаних з нею мінімумів магнітного поля -1500 нТл. Більша інтенсивність мінімумів на північному сході

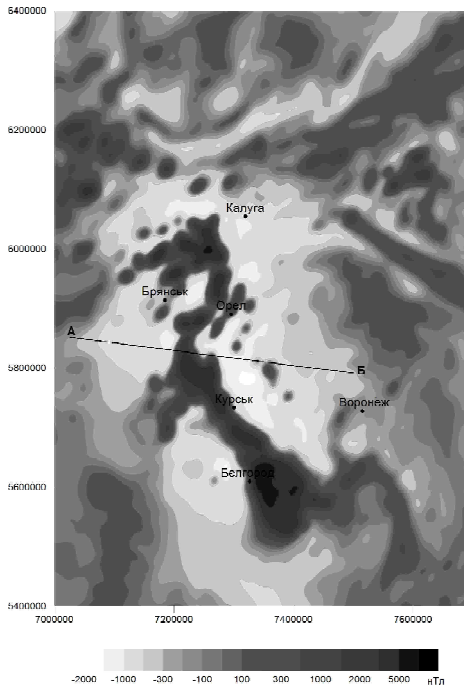


Рис. 2. Карта аномального магнітного поля на висоті 5 км [8, 9]

свідчить про намагніченість регіональних джерел за сучасним магнітним полем. Можна також прогнозувати регіональне зміщення голови “шахового коня” на північний схід від його тулуба (а можливо, що вона внаслідок цього зсуву і утворилася?). Такий самий зсув можна прогнозувати і на південному сході (рис. 3, б).

Локальні аномалії магнітного поля з максимальною інтенсивністю до 3500 нТл просторово збігаються із зонами регіональних аномалій, що без сумніву свідчить про їх генетичний зв’язок. Простягання локальних аномалій також переважно північно-західне та північно-східне. Останнє характерне передусім для прогнозованих за регіональним полем зсувів на північному заході та південному сході досліджуваної території. Великий інтерес становить кільцеподібна форма локальної компоненти геомагнітного поля в межах найінтенсивнішого максимуму регіональної аномалії на південному сході регіону. Ця кільцеподібна аномалія немовби оконтурює глибинне регіональне джерело.

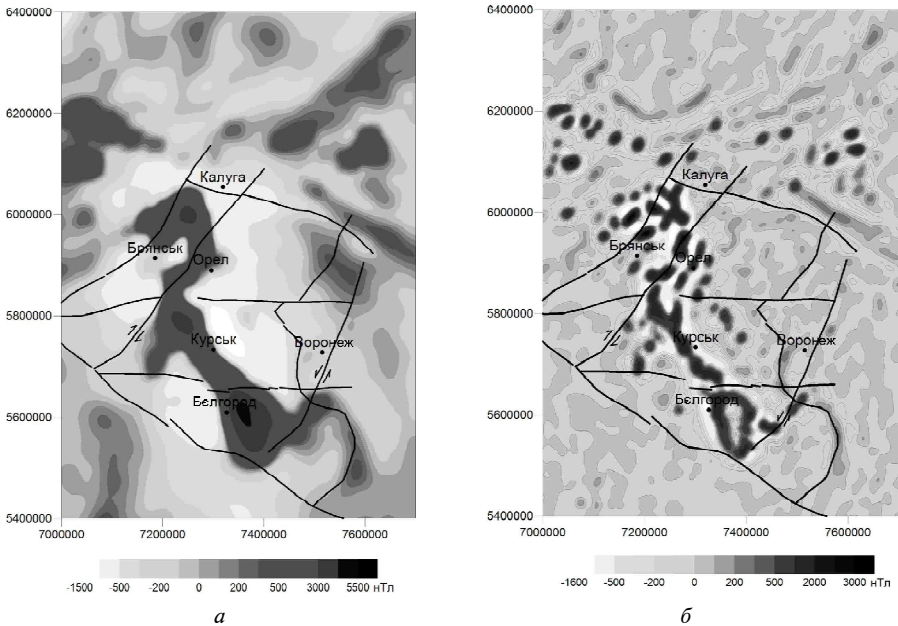


Рис. 3. Регіональна (а) та локальна (б) компоненти аномального магнітного поля району КМА. Штриховою лінією позначено головні розломи [14]

Аналіз магнітного поля. Перша спроба виділити регіональну складову аномального магнітного поля району досліджень була зроблена в роботі [2]. В ній на підставі перерахунку поля було розраховано аномалії на висотах 20 і 40 км, з якого випливало, що КМА на цих висотах практично не відчувається. Реальні значення поля на стратосферних висотах отримали співробітники ІЗМІРАН за результатами експериментальних спостережень [5, 15, 16]. Зауважимо, що ці значення аномалій та їх градієнтів на висотах 10 і 28–30 км виявились істотно більшими, ніж значення, одержані за результатами трансформації поля у верхній півпростір або оцінки їх загасання згідно з оператором e^{-wh} , де $w = 2\pi/\lambda$, λ – довжина хвилі. Так, для джерела з довжиною хвилі на поверхні 70 км на земній поверхні та інтенсивності поля 600 нТл, перераховане на висоту згідно з оператором, інтенсивність поля має становити 245 нТл на висоті 10 км і 40 нТл на висоті 40 км, тоді як поле, розраховане від моделі, має значення 320 і 145 нТл відповідно. Якщо перерахувати поле з висоти 10 на 30 км, то в цьому випадку розбіжність буде суттєво меншою – 122 нТл порівняно з 145 нТл. Все це засвідчує, що навіть для перерахунку поля на висоту

від ізольованого джерела необхідно враховувати зміну довжини хвилі з висотою перерахунку. У зв'язку з цим перерахована найпростіша модель, а саме: залізісті кварцити верхньої частини кори апроксимовані джерелом завтовшки 4,5 км, протяжністю 450 км, верхньою кромкою на глибині 0,5 км, нижньою – на глибині 10 км і намагніченістю 100 А/м. Для такої моделі на висоті 0,4 км у максимумі значення поля становить 40 000 нТл, на висоті 20 км – понад 1200 нТл. І навіть на висоті польоту супутника (350–450 км) в максимумі зберігається 5–6 нТл. Ці значення від досить грубої, оцінної, моделі непогано відповідають полю $(\Delta T)_a$, отриманому в результаті магнітного знімання.

В 1975 р. було виконано один з перших аеростатних польотів у районі КМА [16]. Згідно з результатами спостережень уздовж траси польоту аеростата на висоті 25 км, величина модуля індукції магнітного поля змінюється в межах $T = 49\ 250\text{--}50\ 800$ нТл (рис. 4, *a*). З урахуванням величини нормального магнітного поля B_0 було виділено його аномальну складову (рис. 4, *b*), інтенсивність якої становить у максимумі магнітної аномалії $\Delta T = 1200$ нТл на висоті 25 км, $\Delta T = 2400$ нТл (9 км) і $\Delta T = 10\ 000$ нТл на земній поверхні (див. таблицю).

Отже, із збільшенням висоти знімання швидкість затухання поля зменшується (рис. 4, *в*) і на супутникових висотах 350 і 700 км величина аномального магнітного поля становить 28 і 3 нТл відповідно. Зауважимо при цьому, що виділення аномалій на супутникових висотах є складною проблемою, тому що магнітосферно-іоносферні складові та завади зіставні за інтенсивністю з аномаліями корової природи. Тому важливим є розрахунок магнітного поля від корових джерел на відповідних висотах для зіставлення з виділеними джерелами за результатами знімань. У роботах [6–9, 11] показано, що магнітні джерела КМА (намагніченість $I = 6\text{--}10$ А/м) у сукупності з іншими джерелами Українського щита та Воронезького кристалічного масиву добре задовольняють характер аномального магнітного поля на всіх висотах. Звичайно є певні відмінності щодо просторового зіставлення розрахованих і спостережених (особливо на супутникових висотах) аномалій, але це питання буде знято розробкою детальніших моделей земної кори району КМА та можливістю розрахунку вертикальної та горизонтальної компонент аномального магнітного поля.

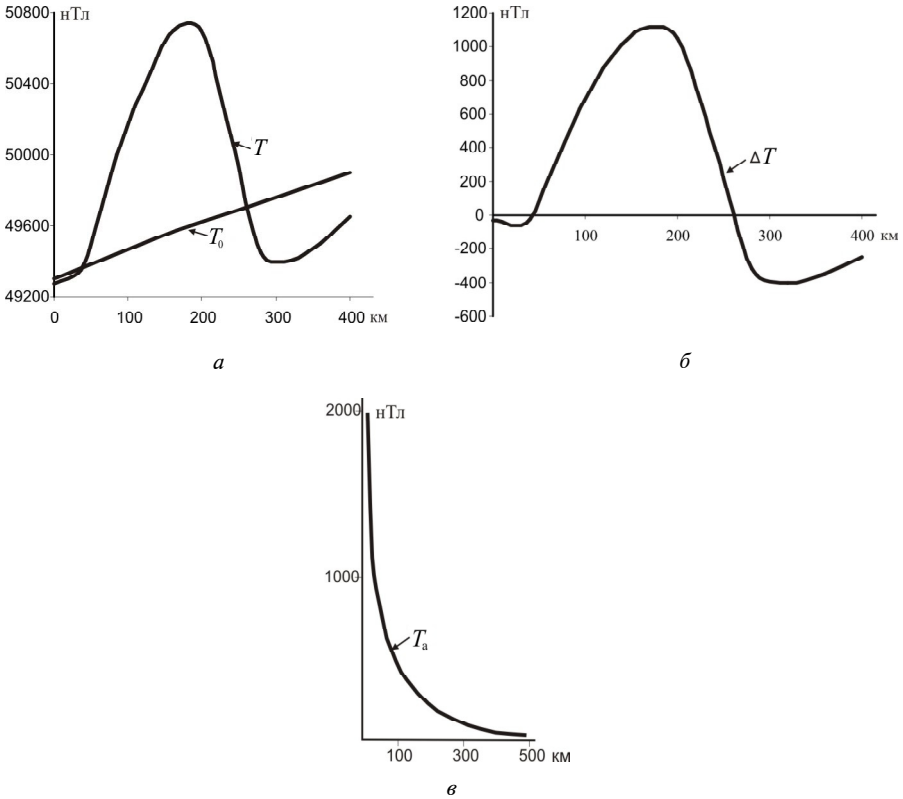


Рис. 4. Результати спостережень і розрахунків геомагнітного поля вздовж профілю А–Б (див. рис. 2): спостережене поле T та його нормальна складова T_0 (а), аномальне магнітне поле (б) і залежність індукції аномального магнітного поля від висоти знімання (в)

Величина індукції аномального магнітного поля ΔT Курської магнітної аномалії залежно від висоти знімання

Дані	Висота знімання, км	ΔT , нТл
Аеромагнітні	9	2400
Аеростатні	25	1200
Супутникові	350	28
	700	3
Магнітної карти		10000

Висновки.

1. Узагальнено всі наявні картографічні матеріали щодо геомагнітного поля району Курської магнітної аномалії.
2. Розроблено цифрову версію карти аномального магнітного поля ΔT на висоті 5 км.
3. Проаналізовано характер аномального магнітного поля ΔT на поверхні Землі, висоті 5 і 30 км та супутникових висотах: окремі аномалії КМА мають на поверхні інтенсивність від -6000 до $15\ 000$ нТл, на висоті 5 км аномалії змінюються в межах від -1500 до 3500 нТл. На висоті 30 км за результатами знімів КМА характеризується інтенсивністю 1200 нТл, а на висоті 400 км – 14 нТл.
4. Розраховане магнітне поле від корових джерел добре задовольняє спостережені аномалії на всіх висотах.
5. Виділено регіональну та локальну складові аномального магнітного поля ΔT , які відзначаються великою інформативністю щодо подальшого вивчення структури та складу земної кори, а також геодинамічних реконструкцій.

1. *Абрамова Д.Ю.* О перспективах использования спутниковых измерений для анализа региональных магнитных аномалий / Д.Ю. Абрамова, Л.М. Абрамова, С.В. Филиппов [и др.] // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 6. – С. 1–11.
2. *Борисов А.А.* Региональные и зональные аномалии геомагнитного поля европейской части СССР / А.А. Борисов, Г.И. Круглякова // Сов. геология. – 1967. – № 1. – С. 127–130.
3. *Карта аномального магнитного поля (ΔT)_n СССР* (континентальная часть и некоторые прилегающие акватории). М. 1 : 2 500 000 / [З.А. Макарова]. – М.: ГУГК, 1977. – 16 л.
4. *Карта аномального магнитного поля Европы.* – 1 : 5 000 000 / [Т.Н. Симоненко, И.К. Пашкевич]. – Киев: ГУГК, 1990. – 2 л.
5. *Луговенко В.Н.* О разделении геомагнитного поля на аномальную и нормальную составляющие / В.Н. Луговенко. – М.: Наука, 1969. – 104 с.
6. *Орлюк М.И.* Строение литосферы вдоль геотраверса III. Магнитная модель / М.И. Орлюк // Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы III, VII IX. – Киев: Наук. думка, 1993. – С. 30–35.
7. *Орлюк М.И.* Пространственные и пространственно-временные магнитные модели разноранговых структур литосферы континентального типа / М.И. Орлюк // Геофиз. журн. – 2000. – Т. 22, № 6. – С. 148–165.
8. *Орлюк М.И.* Розробка регіональної 3D магнітної моделі земної кори південно-західного краю Східно-Європейської платформи (з врахуванням сферичності Землі) / М.И. Орлюк, А.В. Марченко (а) // Вісн. Київ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Геологія. – 2011. – Т. 54. – С. 41–43.

9. Орлюк М.І. Розробка 3D магнітної моделі земної кори Східно-Європейського кратону з врахуванням сферичності Землі / М.І. Орлюк, А.В. Марченко (б) // Геодинаміка. – 2011. – № 2(11). – С. 224–227.
10. Орлюк М.І. Расчет полных значений компонента вектора индукции геомагнитного поля B на поверхности Земли и спутниковых высотах (на примере ВЕП) / М.І. Орлюк, А.В. Марченко, И.Н. Иващенко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 40-й сессии семинара им Д.Г. Успенского, г. Москва, 28 янв. – 1 февр. 2013 г. – М.: ИФЗ РАН, 2013. – С. 251–254.
11. Пашкевич И.К. Магнитная модель литосферы Европы / И.К. Пашкевич, В.С. Марковский, М.И. Орлюк [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1990. – 168 с.
12. Ротанова Н.М. Аномальные магнитные поля на спутнике CHAMP для территории Курской магнитной аномалии / Н.М. Ротанова, А.Л. Харитонов, А.Х. Фрунзе // Геомагнетизм и аэрономия. – 2005. – Т. 45, № 5. – С. 712–719.
13. Серия карт аномального магнитного поля ΔT , СССР. М 1 : 200 000. Листы: N-36-XXIX (XXX, XXXV, XXXVI), N-37-XXV (XXXI), M-36-V(VI), M-37-I (II, VII, VIII, IX, X, XIII, XIV, XV, XVI, XVII). Курская магнитная аномалия. – М.: ВСЕГЕИ, 1966–1984 гг.
14. Старостенко В.И. Основные типы земной коры Украинского щита и Воронежского массива по результатам трехмерного гравитационного моделирования / В.И. Старостенко, П.Я. Куприенко, И.Б. Макаренко // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 40-й сессии семинара им. Д.Г. Успенского, г. Москва, 28 янв. – 1 февр. 2013 г. – М.: ИФЗ РАН, 2013. – С. 238–242.
15. Цветков Ю.П. Исследование аномального магнитного поля Земли на стратосферных высотах / Ю.П. Цветков // Геомагнетизм и аэрономия. – 1993. – Т. 33, № 6. – С. 159–164.
16. Цветков Ю.П. Дистанционное сканирование земной коры / Ю.П. Цветков, Н.М. Ротанова // Природа. – 2001. – № 11. – С. 11–17.
17. Colles R.L. Vfgnetic anjvaly maps from 40 N to 83 N derived from Magsat satellite data / R.L. Colles, G.V Haines, G. Jansen van Beek [et al.] // Geophys. Res. Lett. – 1982. – V. 9, N 4. – P. 281–289.
18. Purucker M.E. Magnetic Anomaly Map of the World / M.E. Purucker // Eos. – 2007. – V. 88, N 25, 19 June. – P. 263.
19. Taylor P. The nature of the Kursk magnetic anomaly from modeling MAGSAT and aeromagnetic data / P. Taylor, J. Heirtzler, K. Nazarova [et al.] // IUGG XXI General Assembly. Boulder. 5–14 Aug., 1995. Abstract, week 3, GAB 12 F-7. – P. 1387.
20. Taylor P.T. Qersted and Magsat: A comparison over the Kursk magnetic anomaly / P.T. Taylor, von Frese R.R.B., H.R. Kim // Proc. of 3rd Int. Sci. Team Meet. Grasse, rance, May 2–4, 2000. – Grasse, 2000.

Курская магнитная аномалия: анализ аномального магнитного поля по данным наземных, стратосферных и спутниковых съемок М.И. Орлюк, А.В. Марченко, М.И. Бакаржиева

Обобщены все имеющиеся картографические материалы по геомагнитному полю Курской магнитной аномалии (КМА). Выполнен анализ аномального магнитного поля (ΔT_a) на земной поверхности, высоте 5 и 30 км, а также спутниковых высотах. Отдельные аномалии КМА имеют на поверхности интенсивность от -6000 до $15\,000$ нТл, на высоте 5 км изменяются в пределах от -1500 до 3500 нТл. Интенсивность аномалии по данным стратосферных и спутниковых наблюдений составляет: на высоте 30 км – 1200 нТл, а на 400 км – 14 нТл.

Ключевые слова: Курская магнитная аномалия, геомагнитное поле, магнитная модель.

Kursk magnetic anomaly: analysis of the anomalous magnetic field according to the ground, stratospheric and satellite surveys M.I. Orlyuk, A.V. Marchenko, M.I. Bakarjieva

All the available cartographic materials on the geomagnetic field of the Kursk Magnetic Anomaly are summarized. Analysis of the anomalous magnetic field (ΔT_a) at the surface, height of 5 and 30 km, as well as the satellite altitude was made. Some anomalies have on the surface intensity of -6000 nT to $15\,000$ nT at an altitude of 5 km vary in the range -1500 – 3500 nT. The intensity of the anomaly according stratospheric and satellite observations are as follows: at an altitude of 30 km – 1200 nT, and 400 km – 14 nT.

Keywords: Kursk magnetic anomaly, geomagnetic field, magnetic model.