

Магнитное склонение на территории Украины: результаты наблюдений и вычислений

© М. И. Орлюк, А. А. Роменец, А. В. Марченко, И. М. Орлюк,
И. Н. Иващенко, 2015

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 24 сентября 2014 г.
Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Запропоновано технологію розрахунку силових та кутових компонент вектора індукції магнітного поля Землі. Технологія ґрунтується на розробці тривимірної моделі земної кори і розрахунку від неї північної (ΔB_{ax}), східної (ΔB_{ay}) та вертикальної (ΔB_{az}) складових аномального магнітного поля, які у поєднанні з відповідними складовими (B_{0x} , B_{0y} , B_{0z}) нормального поля дають змогу визначити повні значення B_x , B_y , B_z -компонент магнітного поля Землі. З їх використанням розраховуються величина горизонтальної компоненти (B_H) геомагнітного поля та кути його схилення D і нахилення I . Розраховано величини магнітного схилення D на територію України на епоху 2010 р. (змінюється від -6° до $+20^\circ$) та віковий хід на період 2010—2015 рр. (6,0—7,5 хв/рік). Оцінено внесок у величину магнітного схилення D її нормальної (D_0) та аномальної (ΔD) складових. Точність розрахованих величин D оцінено зіставленням із замірними значеннями магнітного схилення на магнітних обсерваторіях та пунктах вікового ходу. Для більшості пунктів різниця варіює в межах 3—6 хв. Результати розрахунків магнітного схилення D для часового інтервалу 2010—2015 рр. використовують державні служби України («Украерорух», «Топографічна служба ЗСУ») для забезпечення безпеки польотів та розробки топографічних карт.

Ключові слова: магнітне схилення, Україна, компоненти магнітного поля Землі.

Введение. В историческом аспекте магнитное склонение было первым измеряемым параметром, который сыграл не только основополагающую роль в морской навигации, но и стал в дальнейшем главным источником информации о пространственно-временной структуре геомагнитного поля [Гордин, 2004]. На практике магнитное склонение используют для ориентации линий и маршрутов в пространстве, поэтому оно широко применяется при решении многих важных задач: при сертификации аэропортов и обеспечения аэронавигационных карт (нанесение по всем маршрутам воздушного движения значений магнитного склонения); строительстве крупных сооружений (атомные и гидроэлектростанции, порты, авиазаводы и т. п.); разработке всего ряда топографических карт (с вынесением в ряде случаев на карту времени измерения); подземной и подводной навигации (инклинометрия при бурении скважин, ориентация подводных лодок и т. д.).

Магнитное склонение имеет существенные пространственно-временные изменения, что требует его непрерывного мониторинга путем экспериментальных измерений. Поскольку из-

мерение силовых и угловых компонент магнитного поля Земли, включительно с магнитным склонением, является довольно трудоемкой задачей, то в данной статье рассмотрена технология их вычисления. Результаты вычислений сопоставлялись с измеренными значениями в обсерваториях и на пунктах векового хода. Расчет компонент магнитного поля Земли представляется весьма важной задачей, решение которой позволит извлечь дополнительную информацию из имеющихся на данный момент экспериментальных геомагнитных данных.

В связи с большой трудоемкостью измерений силовых и угловых компонент геомагнитного поля количество экспериментальных данных ограничено. В частности, для территории Украины на эпоху 2010 г. имеются данные измерений для 3 геомагнитных обсерваторий и 54 пунктов векового хода (ПВХ), которые, согласно методике, расположены в местах со спокойным характером геомагнитного поля. В связи с этим весьма важна пространственно-временная «интерполяция» величин магнитного склонения на участки со сложным характером геомагнитного поля путем разработки

трехмерных моделей земной коры и расчета от них вектора аномального магнитного поля.

Для решение ряда задач магнитологии, геофизики и навигации требуется информация не только о величинах модуля индукции магнитного поля Земли B , но и полных значениях его северной B_x , восточной B_y , горизонтальной B_H и вертикальной B_z компонентах, а также углах его склонения D и наклонения I [Mandea, Purucker, 2005; Korte, Thébault, 2007; Olsen et al., 2009; Старостенко и др., 2009, 2013; Orlyuk, 2001; Orlyuk et al., 2010; Duma et al., 2012; Блох, 2012; Thomson et al., 2013]. Важность этих исследований подчеркивается созданием в Потсдаме (Германия) в 2003 г. рабочей группы MagNetE (European Geomagnetic Repeat Station Survey), которая собирается раз в два года в разных странах Европы (2003 г.: GFZ Potsdam, Adolf Schmidt-Observatory for Geomagnetism, Niemegk; 2005 г.: Institute of Geodesy and Cartography (IGIK), Warsaw; 2007 г.: Romanian Academy Institute of Geodynamics, Bucharest; 2009 г.: Finnish Meteorological Institute, Helsinki; 2011 г.: Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Rome, Italy; 2013 г.: Institute of Geophysics of the Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague) и занимается координацией работы и обобщением экспериментальных исследований в обсерваториях и на ПВХ. Существенным результатом такого сотрудничества является изданная в 2012 г. под эгидой ЮНЕСКО карта магнитного склонения Европы на эпоху 2006 г. [Duma et al., 2012]. Заметим, что все параметры геомагнитного поля измеряются только на магнитных обсерваториях (практически непрерывно), на ПВХ (по редкой сети и с интервалом до 5 лет) [Каратаев, Карагодина, 2008; Korte, Thébault, 2007; Verbanac et al., 2007; Maksymchuk et al., 2010, 2012; Максимчук та ін., 2013], а также в ряде случаев со спутников [Purucker, 2011]. Поэтому естественной представляется необходимость расчета компонент магнитного поля Земли на заданную эпоху для сравнения с измеренными значениями, экстраполяции на последующие эпохи и для «распространения» на области отсутствия измерений. Появилась принципиально новая возможность расчета компонент геомагнитного поля не только на уровень земной поверхности, а и на аэро-, страто- и спутниковые высоты для увязки с наблюдаемыми данными. Наиболее востребованным, в основном для аэронавигации и топографических работ, является измерение и расчет величины магнитного склонения, чему и посвящена данная работа.

Методика. Магнитное склонение изменяется в пространстве и времени и в конкретной точке зависит от значения главного магнитного поля Земли, его аномальной компоненты, обусловленной литосферными (коровыми) источниками, внешнего магнитного поля и поля вариаций. Внешнее магнитное поле и поле вариаций представляют высокочастотную компоненту D , которая автоматически удаляется при определении среднемесячных и среднегодовых значений магнитного склонения. В соответствии с теоретическими расчетами и измерениями пространственная неоднородность магнитного склонения определяется аномальным магнитным полем и может в несколько раз отличаться от его фоновых значений, а временные изменения могут достигать 3—8 мин/год и более. По сложившейся практике топографические, а в некоторых случаях и аэронавигационные карты, не уточнялись по 20—30 лет, т. е. за это время магнитное склонение могло измениться примерно на 1,5—2,5°. В частности, для территории Украины по результатам измерений на ПВХ магнитное склонение изменялось в пределах 2,0—6,8° в 1972 г. и до 4,8—9,0° в 2010 г. [Крутиховська та ін., 1973; Крутиховская и др., 1982; Orlyuk, 2001; Максимчук та ін., 2013; Трегубенко и др., 2013].

Магнитное склонение — это угол между плоскостью магнитного меридиана и плоскостью астрономического (географического) меридиана, или, что то же самое, угол между магнитным и астрономическим азимутами на какую-либо удаленную от точки измерения миру [Каратаев, Карагодина, 2008]. Теоретически магнитное склонение D в произвольной точке P на земной поверхности в момент времени t определяется отношением восточной B_y и северной B_x составляющих геомагнитного поля (вектора индукции магнитного поля Земли): $\operatorname{tg}D(P, t) = B_y(P, t)/B_x(P, t)$. Другими словами, для определения магнитного склонения нужно измерить или вычислить восточную B_y и северную B_x составляющие вектора геомагнитного поля. В данной работе авторы сознательно не останавливались на методике абсолютных измерений геомагнитного поля и магнитного склонения, поскольку она детально изложена в многочисленных, в том числе и наших, публикациях [Jankowski, Sucksdorff, 1996; Newitt et al., 1996; Нечаев, 2006; Каратаев, Карагодина, 2008; Dominici et al., 2011; Maksymchuk et al., 2012 и др.].

Внутреннее магнитное поле Земли является векторной суммой поля ядра (главного магнитного поля) B_0 и аномального магнитного поля

ΔB_a . В практике магнитометрических работ в настоящее время измеряется модуль вектора индукции магнитного поля Земли B (раньше измерялись также аномалии его вертикальной составляющей ΔB_{az}):

$$B = \sqrt{(\Delta B_{ax} + B_{0x})^2 + (\Delta B_{ay} + B_{0y})^2 + (\Delta B_{az} + B_{0z})^2}. \quad (1)$$

В дальнейшем с помощью этих данных разрабатываются карты аномального магнитного поля ΔB_a , которые широко используются для решения многих геолого-геофизических задач. Соответственно, для решения поставленной задачи в нашем распоряжении имеются значения аномального ΔB_a и нормального B_0 магнитного полей. Модуль вектора индукции нормального магнитного поля Земли B_0 , его северная B_{0x} , восточная B_{0y} и вертикальная B_{0z} составляющие, отражающие его пространственно-временную глобальную характеристику, рассчитываются по моделям IGRF (DGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900—2020), которые разрабатываются с использованием данных обсерваторских, наземных и спутниковых наблюдений на определенную эпоху [Pugucker, 2011]. Для аномального магнитного поля имеются только значения аномалий модуля индукции ΔB_a . Математическое обеспечение и программно-алгоритмический комплекс, позволяющий рассчитывать вектор намагниченности источников магнитных аномалий для произвольного соотношения составляющих вектора ΔB_a , были разработаны В. Н. Коваленко-Завойским и И. Н. Иващенко [Коваленко-Завойский, Иващенко, 2006]. Данная технология была усовершенствована и опробована при интерпретации региональной компоненты аномального магнитного поля [Орлюк и др., 2008, 2012]. При этом предусмотрен расчет вектора аномального магнитного поля с учетом индуктивной и остаточной намагниченности отдельных источников. С учетом известных величин составляющих нормального магнитного поля Земли легко вычисляются соответствующие компоненты модельного поля ΔB_{Mx} , ΔB_{My} , ΔB_{Mz} , ΔB_M , которые с некоторой погрешностью соответствуют составляющим ΔB_{ax} , ΔB_{ay} , ΔB_{az} , ΔB_a аномального поля.

Вычисление модуля вектора индукции магнитного поля B и абсолютных значений его северной B_x , восточной B_y и вертикальной B_z компонент производится путем суммирования в расчетных точках соответствующих составляющих нормального (B_{0x} , B_{0y} , B_{0z}) и модельного (ΔB_{Mx} , ΔB_{My} , ΔB_{Mz}) полей:

$$\begin{aligned} B &= B_0 + \Delta B_a, \quad B_x = B_{0x} + \Delta B_{ax}, \\ B_y &= B_{0y} + \Delta B_{ay}, \quad B_z = B_{0z} + \Delta B_{az}. \end{aligned} \quad (2)$$

Значение горизонтальной составляющей, а также углы склонения D и наклонения I суммарного вектора магнитного поля Земли определяются выражениями

$$\begin{aligned} B_H &= \sqrt{B_x^2 + B_y^2}, \quad D = \arccos(B_x/B_H), \\ I &= \arcsin(B_z/B). \end{aligned} \quad (3)$$

Для расчета величин магнитного склонения на уровень земной поверхности необходима цифровая карта ее рельефа. Такая карта была создана в научно-исследовательском институте геодезии и картографии в виде таблиц значений высотных отметок (Балтийская система) и использована для построения матрицы с размерами элементарной ячейки 1×1 км [Ентин и др., 2015]. Также для территории Украины разработана карта рельефа в единой для всей планеты системе WGS 84 (World Geodetic System 1984). Сопоставление высот рельефа земной поверхности в пунктах векового хода, измеренных GPS-навигатором и интерполированных с данной карты, показывает хорошее соответствие в пределах ± 10 м. На основании WGS 84 определены высоты в точках вычисления (матрица с размером ячейки $0,25 \times 0,25^\circ$) магнитного склонения D . Точность расчета магнитного склонения контролировалась путем сопоставления с измеренными значениями на обсерваториях «Киев» и «Одесса», а также пунктах векового хода [Трегубенко и др., 2013].

Результаты. Предложенная методика была опробована при расчете компонент магнитного поля на земной поверхности на примере региональных магнитных аномалий и для районов Одесской и Черниговской магнитных аномалий [Орлюк и др., 2012, 2014а]. В данной работе проведен расчет углов склонения вектора геомагнитного поля для территории Украины с учетом влияния коровых источников аномального магнитного поля на эпоху 2010 г. и сделан прогноз на 2014 г. Карта аномального магнитного поля ΔB_a (электронный вариант разработан с использованием карты [Нечаева та ін., 2002]), нормального магнитного поля $B_0=B_{IGRF}$ на эпоху 2010 г. (рассчитанного на основании аналитической модели (<http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>), а также модуля индукции B представлена на рис. 1.

Аномальное магнитное поле территории Украины имеет сложный характер со множеством субизометричных и вытянутых анома-

лий регионального (размеры в поперечнике 60—100 км) и локального (1—10 км) классов. На фоне чрезвычайно дифференцированно-го геомагнитного поля ΔB_a выделяются области с интенсивностью аномалий от -2000 до $+13000$ нТл, обусловленные в большинстве случаев железистыми образованиями Голованевского, Криворожско-Кременчугского, Белозерского, юго-восточным продолжением Курского районов и т. д. Нормальное магнитное поле на эпоху 2010 г. изменяется в пределах 48340—51030 нТл, увеличиваясь с юго-юго-запада на северо-северо-восток. Модуль индукции геомагнитного поля B изучаемого региона изменяется в пределах от 48300 нТл на юго-западе территории Украины до 56350 нТл на ее севере и северо-востоке. Естественно, что дифференциация и характер модуля индукции B большей частью определяются таковыми аномального магнитного поля [Орлюк, Роменец, 2005].

За основу при расчете компонент вектора индукции аномального магнитного поля ΔB_a была принята региональная трехмерная магнитная модель земной коры территории Украины [Орлюк, 1996, 2000]. Она была дополнена более детальными 3D магнитными моделями отдельных районов [Орлюк и др., 2014а,б; Орлюк, Марченко, 2011; Роменец, Орлюк, 2011; Магнитная..., 1990] и поэтому в ней нашли отражение не только региональные, а и крупные локальные источники. Разработанная 3D магнитная модель земной коры территории Украины представлена 220 источниками, рассчитанное поле от которых с приемлемой точностью удовлетворяет региональную компоненту аномального магнитного поля (± 50 нТл), а также крупные, интенсивные локальные аномалии (± 150 нТл). Отметим, что полученные расчетным путем значения намагниченности приповерхностных и глубинных источников не противоречат экспериментальным данным [Крутиховская и др., 1982]. Модель источников отдельных аномалий состоит из блоков с вертикальными и наклонными боковыми гранями, расположенными на глубине от 1 до 10 км (источники локальных магнитных аномалий) и от 7—10 до 30—45 км (источники региональных аномалий). Намагниченность источников изменяется от 0,1 до 10,0 А/м и более в районе Курской и Криворожско-Кременчугских аномалий.

Для расчета силовых и угловых компонент геомагнитного поля и их динамики были разработаны карты модуля индукции B_0 нормального магнитного поля Земли IGRF и его составляющих (B_{0x} , B_{0y} и B_{0z}) на эпоху 2010 и

2014 г., что дало возможность количественно оценить изменение аномального магнитного поля от модели за указанный период. Отметим, что расчет компонент геомагнитного поля на 2014 г. носит прогнозный характер, поскольку окончательный вариант нормального магнитного поля Земли IGRF будет выполнен в 2015 г. Однако с учетом результатов наблюдения магнитного склонения на обсерваториях «Киев» и «Одесса», а также довольно «мобильного» online-режима корректировки поля IGRF на 2014 г. (с учетом наземных (обсерваторий INTERMAGNET) и спутниковых (The Swarm satellite mission) наблюдений [Thomson et al., 2013]) можно предположить небольшое расхождение их рассчитанных и наблюдаемых значений.

С использованием величины модуля индукции B_0 нормального магнитного поля Земли (IGRF), а также его компонент B_{0x} , B_{0y} и B_{0z} рассчитано аномальное магнитное поле от модели земной коры на эпохи 2010 и 2014 гг. Было установлено, что за счет изменения внешнего (по отношению к коровым источникам) поля B_0 , аномальное магнитное поле ΔB_M от модели за счет «подмагничивающего» эффекта за указанный период изменяется от $-1,5$ до $+5,0$ нТл, достигая в максимумах интенсивных аномалий более 8 нТл. Естественно, максимальные изменения относятся к областям интенсивных магнитных аномалий.

С учетом значений силовых и угловых характеристик нормального и модельного (аномального) полей по формуле (2) были рассчитаны величины модуля вектора индукции магнитного поля B и его составляющих B_x , B_y и B_z . Заметим, что изменение вектора индукции аномального поля обуславливается нормальным полем Земли, которое выступает в роли внешнего «намагничивающего поля» относительно источников модели. Угловые компоненты вектора индукции магнитного поля Земли рассчитывались по формулам (3).

На рис. 2 представлена карта рассчитанных значений магнитного склонения D и его аномалий ΔD на эпоху 2010 г. В соответствии с расчетами распределение магнитного склонения на территории Украины имеет довольно сложный характер и в общем изменяется в пределах от $-6,0$ до 20° . Его величины закономерно увеличиваются с юго-запада на северо-восток (от $4,5$ до $9,5^\circ$). Основная часть величины магнитного склонения определяется ее нормальной компонентой D_{IGRF} , которая закономерно увеличивается от $4,8^\circ$ на крайнем юго-западе до $8,0^\circ$ на

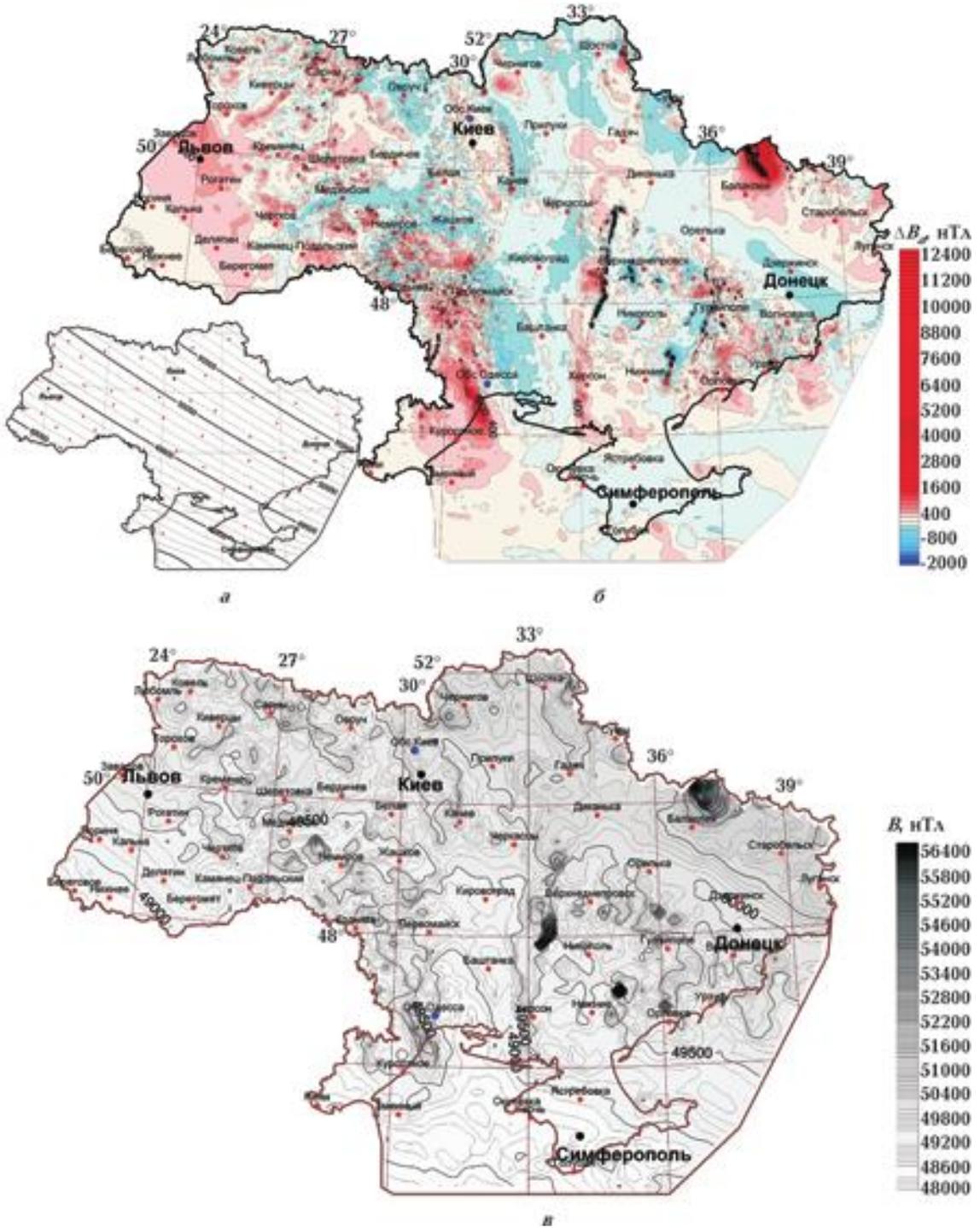


Рис. 1. Нормальное магнитное поле B_{IGRF} (а), аномальное магнитное поле ΔB_a (б), и модуль индукции B (в) на территории Украины (эпоха 2010 г.).

северо-востоке (рис. 2, а). На этом региональном фоне выделяются аномалии магнитного склонения ΔD , связанные с неоднородностью аномального магнитного поля. Величина этих аномалий изменяется в пределах от -12 до 13°

с максимальными отклонениями от фоновых значений в местах интенсивных магнитных аномалий регионального и локального классов.

Для большей части территории Украины величина ΔD за счет источников аномального

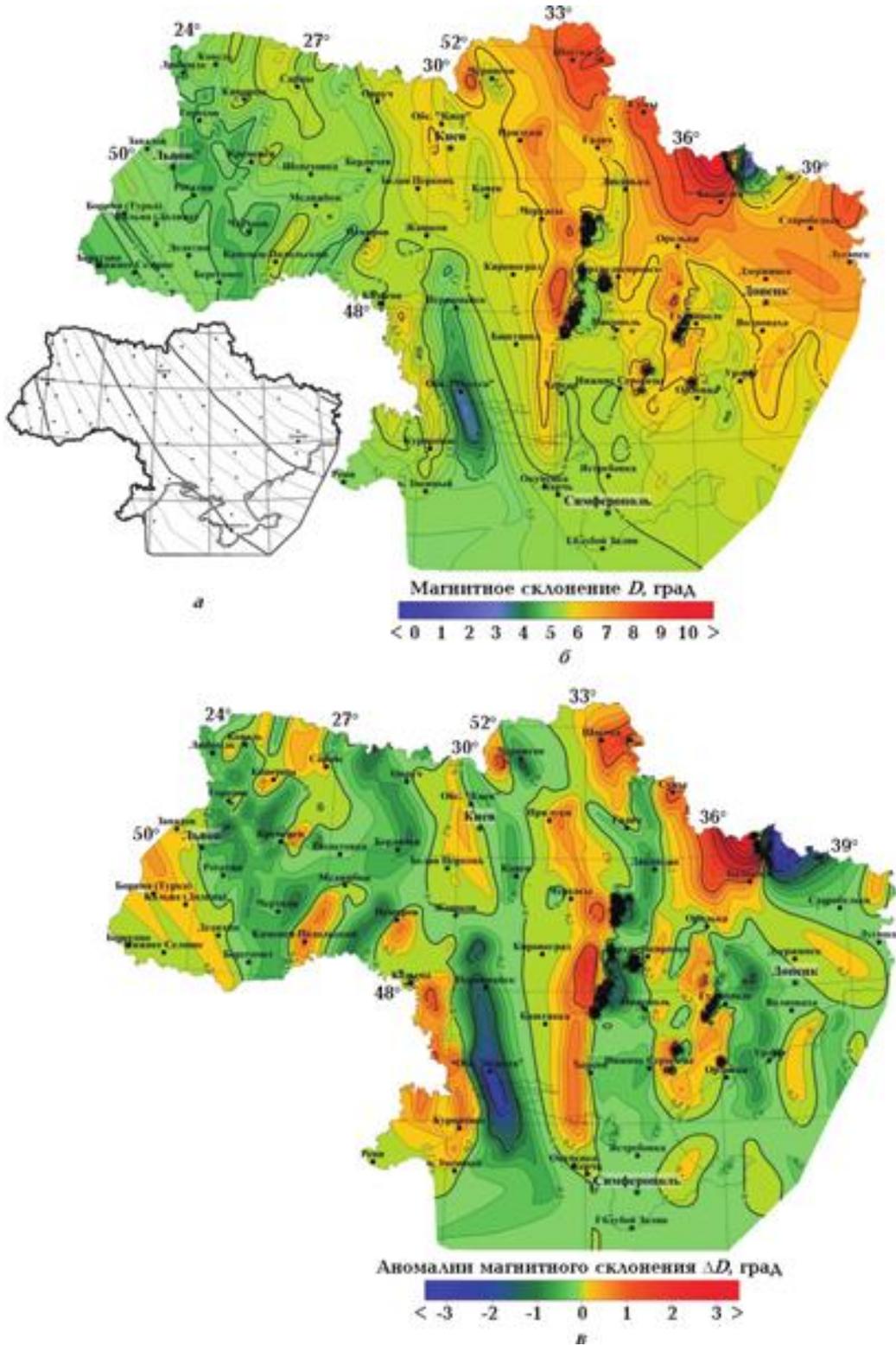


Рис. 2. Магнитное склонение D_{IGRF} (а), D (б) и его аномалии ΔD (в) на территории Украины (эпоха 2010 г.).

магнитного поля находится в пределах от -3 до 3° , но в районе Курской магнитной аномалии и некоторых интенсивных локальных

аномалий достигает значений от -13 до 14° . Распределение ΔD определяется характером аномального магнитного поля. Полученные

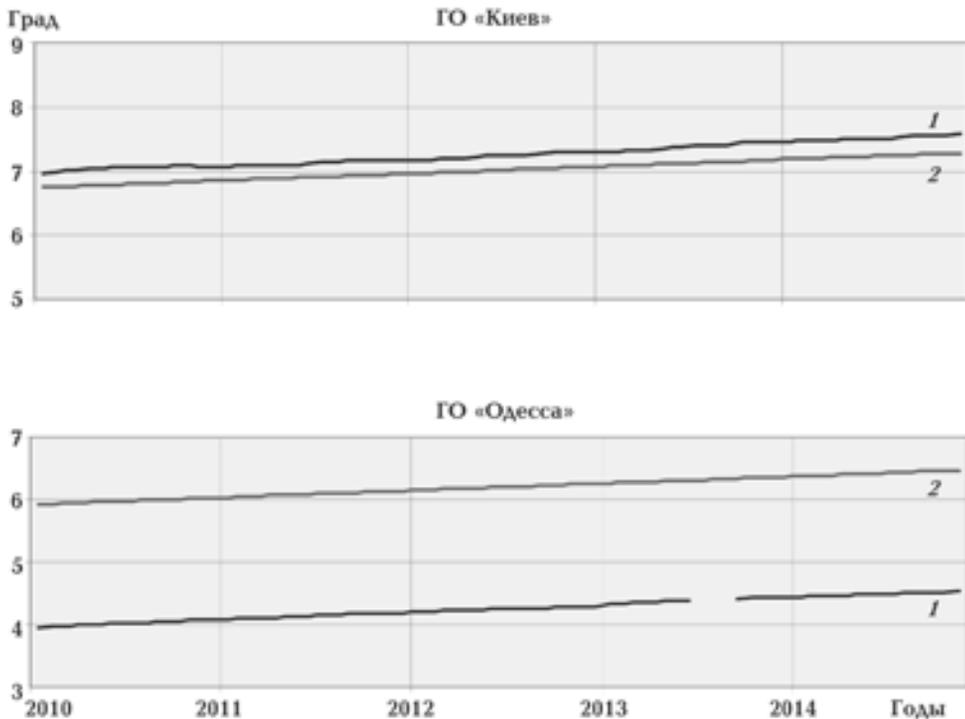


Рис. 3. Магнитное склонение D по данным обсерваторий «Киев» и «Одесса» (1) и расчетное D_{IGRF} (2) (IGRF/IGRF Geomagnetic Field Model 1900—2020).

результаты свидетельствуют о существенных изменениях магнитного склонения на территории Украины. Естественно, что наибольшие изменения обусловлены главным магнитным полем Земли, но и аномальная его часть вносит определенный вклад в суммарные значения. В частности, за счет Одесской аномалии интенсивностью $\Delta B_a = 700$ нТл наблюдаются аномалии магнитного склонения в пределах первых градусов, а для интенсивных источников может достигать десятков градусов. В качестве конкретного примера можно привести изменение магнитного склонения на обсерватории «Одесса», где абсолютное значение D почти на 2° меньше по сравнению с его нормальным значением по модели IGRF [Орлюк и др., 2014а].

Оценка точности расчета магнитного склонения на эпоху 2010 г. выполнена путем сопоставления с измеренными значениями на геомагнитных обсерваториях и пунктах векового хода. Как видно из таблицы, разница между рассчитанными и измеренными значениями находится в пределах $D_{набл.} - D_{расч.} = \pm(0,05 - 0,1^\circ)$, т. е. равняется $\pm(3 - 6')$, что вполне достаточно для региональных построений (карта масштаба 1: 2500000), необходимых для нужд авионавигации и т. д.

Незначительные ($\pm(0,2 - 0,3^\circ)$, $12 - 18'$, Баштанка, Белая Церковь, Шепетовка, Старобельск), а также существенные расхождения рассчитанных и измеренных значений в некоторых ПВХ (Гуляйполе — более 2°) могут быть обусловлены масштабом работ или наличием неучтенных помех. Естественно, возможно построение карт магнитного склонения более крупных масштабов, что предопределяется разработкой соответствующих магнитных моделей.

Анализ изменений главного магнитного поля Земли во временном интервале 2010—2015 гг. в соответствии с моделью IGRF, а также результатов наблюдений на геомагнитных обсерваториях «Киев» и «Одесса» свидетельствует о закономерном возрастании магнитного склонения D (рис. 3).

В частности, для обсерватории «Киев» величина магнитного склонения, рассчитанного по обсерваторским данным за 2010—2014 гг., изменилась от $6,96^\circ$ в 2010 г. до $7,58^\circ$ в 2014 г. (среднегодовой прирост $\sim 0,16$ град/год). Величина D_{IGRF} для этого временного интервала изменяется в пределах от $6,75^\circ$ в 2010 г. до $7,26^\circ$ в 2014 г. (прирост $\sim 0,13$ град/год).

Для обсерватории «Одесса» величина магнитного склонения за этот же период измени-

Т а б л и ц а . Наблюденные [Трегубенко и др., 2013] и рассчитанные значения магнитного склонения на эпоху 2010 г.

ПВХ и магнитные обсерватории	Широта	Долгота	$D_{\text{набл.}}$	$D_{\text{расч.}}$	$D_{\text{набл.}} - D_{\text{расч.}}$
Балаклея	49°36'10,9"	36°50'00"	8,348	8,5	-0,152
Баштанка	47°30'34,8"	32°06'23,6"	6,587	6,375	0,212
Бердичев	50°03'55,5"	28°35'24,1"	5,621	5,56	0,061
Берегово	48°14'03"	22°38'51"	4,781	4,744	0,037
Берегомет	48°11'50"	25°22'39,6"	4,97	4,997	-0,027
Белая Церковь	49°49'09,8"	29°46'24,7"	6,792	6,51	0,282
Бориня (Турка)	49°03'18"	23°03'30,7"	5,18	5,115	0,065
Верхнеднепровск	48°31'21"	34°25'15,6"	6,872	6,98	-0,108
Волноваха	47°37'35,5"	37°37'18,1"	7,293	7,057	0,236
Гадяч	50°28'34,8"	33°59'06,5"	7,286	7,267	0,019
Голубой Залив	44°25'17,8"	33°58'56"	6,01	5,82	0,19
Горохов	50°34'48,5"	24°31'20,3"	4,72	5,23	-0,51
Гуляйполе	47°46'38,5"	36°08'45,9"	8,151	5,692	2,459
Деятин	48°32'56,3"	24°38'01,7"	5,31	5,219	0,091
Держинск	48°23'56,6"	37°45'51,8"	7,345	7,43	-0,085
Диканька	49°50'22,5"	34°37'28,6"	7,088	6,96	0,128
Жашков	49°07'04,6"	30°00'53,3"	6,038	6,18	-0,142
Завадов	50°03'51,5"	23°23'24"	5,544	5,322	0,222
о. Змеиный	45°15'23,8"	30°12'01,1"	5,545	5,58	-0,035
Кальна (Долина)	48°57'11"	23°48'51,3"	5,372	5,239	0,133
Каменец-Подольский	48°34'38,7"	26°36'22"	6,067	6,25	-0,183
Канев	49°44'19"	31°23'11,1"	5,83	5,91	-0,08
Керчь	45°14'34,3"	36°02'33,9"	6,179	5,87	0,309
Киверцы	50°58'13,5"	25°31'58,6"	5,928	6,09	-0,162
Кировоград	48°33'50,3"	32°01'10,1"	6,679	6,55	0,129
Ковель	51°26'55,7"	24°45'29"	5,155	5,176	-0,021
Кодыма	48°03'49"	29°04'29,3"	4,854	4,92	-0,066
Кременец	50°02'55,1"	25°50'25,3"	5,595	5,495	0,1
Курортное	45°54'15"	30°16'04,8"	5,712	6,16	-0,448
Луганск	48°33'31,1"	39°41'46,7"	7,902	7,69	0,212
Любомль	51°16'00"	24°00'28"	4,871	4,886	-0,015
Меджибож	49°28'30,7"	27°25'14,6"	6,005	5,93	0,075
Немиров	49°00'26,9"	28°39'59,5"	6,632	6,26	0,372
Нижнее Селище	48°11'51,3"	23°27'21,4"	4,859	4,967	-0,108
Нижние Серогозы	46°50'09"	34°24'40,3"	5,928	5,98	-0,052
Никополь	47°43'11,4"	34°21'18,5"	5,733	5,86	-0,127
Овруч	51°05'55"	28°42'42,3"	6,065	6,26	-0,195
Окуневка	45°21'51,6"	32°45'02,7"	5,792	5,86	-0,068
Орелька	48°57'20,6"	35°47'39,5"	7,376	7,24	0,136
Орловка	46°39'37,6"	36°06'19,5"	6,813	6,62	0,193
Первомайск	48°02'28,9"	30°44'47,9"	4,982	4,99	-0,008
Прилуки	50°35'19"	32°08'47"	7,395	7,366	0,029
Рени	45°20'16,8"	28°26'28,4"	5,382	5,276	0,106
Рогатин	49°27'16"	24°35'20,5"	5,044	4,987	0,057
Сарны	51°14'12,4"	26°45'32,5"	6,568	6,5	0,068
Старобельск	49°07'05,7"	38°52'02,9"	7,877	7,654	0,223
Сумы	51°00'00,5"	35°06'04,1"	8,933	8,94	-0,007
Урзуф	46°53'09,9"	37°03'37,7"	6,791	6,707	0,084
Херсон	46°46'5,6"	33°06'56,5"	6,019	6,11	-0,091
Черкасы	49°24'20,6"	32°40'11,5"	7,044	7,048	-0,004
Чернигов	51°30'44"	31°26'33,5"	6,123	6,23	-0,107
Чертков	48°59'58"	25°55'37,5"	5,277	5,16	0,117
Шепетовка	49°56'17,7"	27°14'49,7"	5,448	5,66	-0,212
Шостка	51°48'10"	33°24'07"	8,967	8,79	0,177
Ястребовка	45°30'58,7"	34°07'36,7"	6,102	6,036	0,066
Обсерватория «Киев»	50°48'22"	30°16'25,5"	6,766	6,73	0,036
Обсерватория «Одесса»	46°46'36,9"	30°54'00,4"	4,018	4,0	0,018



Рис. 4. Карта векового хода магнитного склонения на территории Украины за период 2010—2015 гг. Изопоры ΔD в град/год.

лась от $3,96^\circ$ в 2010 г. до $4,53^\circ$ в 2014 г. (прирост $\sim 0,14$ град/год), а D_{IGRF} — от $5,93^\circ$ в 2010 г. до $6,47^\circ$ в 2014 г. (прирост $\sim 0,13$ град/год).

Приведенные данные в совокупности с количественной оценкой аномалий магнитного склонения за счет аномального магнитного поля позволяют сделать прогноз среднегодового прироста ΔD до 2015 г. Как видно из рис. 4, величины векового хода магнитного склонения изменяются от $0,1$ град/год ($6,0$ мин/год) на юго-востоке Украины до $0,126$ град/год ($7,56$ мин/год) на северо-западе. Примерно такой же пространственный характер и величины векового хода магнитного склонения ($5,1$ — $7,0$ мин/год) получены и для временного интервала 2005—2010 гг. [Трегубенко та ін., 2013]. Таким образом, на протяжении последних 10 лет наблюдается существенное, но довольно равномерное возрастание магнитного склонения с большей скоростью (примерно на 2 мин/год) на западе Украины по сравнению с ее востоком.

Заключение. Предложенная технология расчета силовых и угловых компонент магнитного поля Земли, в частности магнитного склонения, доведенная до практического ис-

пользования, представляется весьма важной современной научной разработкой, позволяющей извлекать дополнительную информацию из существующих в настоящее время экспериментальных геомагнитных данных. Она позволяет также рассчитывать компоненты вектора геомагнитного поля на земную поверхность, аэро-, страто- и спутниковые высоты, что необходимо для увязки магнитных полей, измененных на соответствующих уровнях.

Разработанная карта магнитного склонения D на эпоху 2010 г. и численный прогноз его векового хода до 2015 г. показывают существенные изменения в пространстве (от $-6,0$ до 20°) и времени (от $0,1$ до $0,126$ град/год). Показано, что в суммарных значениях магнитного склонения D основная часть величины определяется нормальной компонентой D_{IGRF} , на региональном фоне которой выделяются аномалии магнитного склонения ΔD , связанные с неоднородностью аномального магнитного поля ΔB_a . Приведенные в статье результаты расчетов величины магнитного склонения для временного периода 2010—2015 гг. являются востребованными государственными служба-

ми Украины (Государственным предприятием по обслуживанию воздушного движения Украины («Украерорух») и топографической

службой Вооруженных сил Украины) для обеспечения безопасности полетов и обновления всего ряда топографических карт.

Список литературы

- Блох Ю. И. Теоретические основы комплексной магниторазведки. Москва, 2012. 160 с. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-complex.pdf>.
- Гордун В. М. Очерки по истории геомагнитных измерений. Москва: ИФЗ РАН, 2004. 162 с.
- Ентин В. А., Гуськов С. И., Орлюк М. И., Гинтов О. Б., Осьмак Р. В. Карта абсолютных значений поля силы тяжести Украины и некоторые аспекты ее возможной интерпретации. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 1. С. 58—65.
- Каратаев Г. И., Карагодина О. И. Пространственно-временная характеристика магнитного склонения на территории Беларуси и практические аспекты мониторинга. *Литасфера*. 2008. № 2 (29). С. 219—222.
- Коваленко-Завойський В. М. Иващенко І. М. Математичне забезпечення інтерпретації поля ΔB_a регіональних магнітних аномалій. *Геофиз. журн.* 2006. Т. 28. № 5. С. 18—30.
- Крутиховська З. О., Пашкевич І. К., Русаков О. М., Соловйов В. Д. Наземна абсолютна магнітна зйомка території Української РСР. *Вісник АН УРСР*. 1973. № 9. С. 101—102.
- Крутиховская З. А., Пашкевич И. К., Силина И. М. Магнитная модель и структура земной коры Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1982. 216 с.
- Магнитная модель литосферы Европы. Под ред. Г. И. Каратаева. Киев: Наук. думка, 1990. 168 с.
- Максимчук В. Ю., Орлюк М. И., Трегубенко В. І., Марченко Д. О., Накалов Є. Ф., Чоботок І. О. Результаты компонентных измерений магнитного поля на сети пунктов викового ходу 2005—2010 рр. *Геодинаміка*. 2013. № 2(15). С. 219—222.
- Нечаев С. В. Руководство для стационарных геомагнитных наблюдений. Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2006. 140 с.
- Нечаева Т. С., Шимків Л. М., Горкавко В. М. Карта аномального магнітного поля (ΔT_a) України. 1:1 000 000. Київ, 2002. 1 л.
- Орлюк М. И. Методика и первые результаты построения четырехмерной магнитной модели земной коры территории Украины. *Доп. НАН України*. 1996. № 5. С. 95—99.
- Орлюк М. И. Пространственные и пространственно-временные модели разноранговых структур литосферы континентального типа. *Геофиз. журн.* 2000. Т. 22. № 6. С. 148—165.
- Орлюк М. И., Коваленко-Завойский В. Н., Иващенко И. Н., Марченко А. В. Математическое и программно-алгоритмическое представления и интерпретации региональных магнитных аномалий с учетом сферичности Земли. *Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: Материалы 35-й сессии Междунар. семинара им. Д. Г. Успенского (29 января — 3 февраля 2008 г., Ухта)*. Сыктывкар, 2008. С. 231—234.
- Орлюк М. І., Марченко А. В. Розробка 3D магнітної моделі земної кори Східно-Європейського кратону з врахуванням сферичності Землі. *Геодинаміка*. 2011. №2(11). С. 224—227.
- Орлюк М. И., Марченко А. В., Иващенко И. Н. К вопросу о расчете полных значений вектора индукции магнитного поля Земли: *Материалы Второй междунар. конф. «Актуальные проблемы электромагнитных зондирующих систем», 1—4 октября 2012 г., Ин-т геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев*. Conference CD-ROM Proceedings. С. 67—69.
- Орлюк М. И., Марченко А. В., Иващенко И. Н. Расчет компонент геомагнитного поля на примере Одесской магнитной аномалии. *Геодинаміка*. 2014а. № 1(16). С. 96—102.
- Орлюк М. И., Роменец А. А. Новый критерий оценки пространственно-временной возмущенности магнитного поля Земли и некоторые аспекты его использования. *Геофиз. журн.* 2005. Т. 27. № 6. С. 1012—1023.
- Орлюк М. И., Роменец А. А., Марченко А. В., Бакаржиева М. И., Лебедь Т. В. Исследование динамики геомагнитного поля в районе Черниговской региональной аномалии. *Вестник Пермского ун-та. Серия «Геология»*. 2014б. Вып. 3(24). С. 48—59.
- Роменец А. А., Орлюк М. И. Трехмерная магнитная модель земной коры северо-западной части шельфа Черного моря. *Xth International Conference on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. 10—13 May 2011, Kiev, Ukraine*. Paper 080. Conference CD-ROM Proceedings. 4 p.
- Старостенко В. И., Шуман В. Н., Иващенко И. Н., Легостаева О. В., Савченко А. С., Скрипник О. Я. Магнитные поля трехмерных анизотропных тел: теория и практика вычислений. *Физика Земли*. 2009. № 8. С. 20—30.

- Старостенко В. И., Шуман В. Н., Пашкевич И. К., Легостаева О. В., Савченко А. С. Методы восстановления гармонических функций по магнитному полю ΔT и функция В. Н. Страхова ΔS : обзор. *Физика Земли*. 2013. № 1. С. 151—160.
- Трегубенко В. И., Максимчук В. Ю., Орлюк М. И., М'ясоєдов В. П., Марченко Д. О., Роменець А. О. Компоненти магнітного поля Землі на території України для епохи 2010 р. за результатами вимірювання у пунктах вікового ходу. *Мінеральні ресурси України*. 2013. № 3. С. 37—40.
- Dominici G., Meloni A., Miconi M., DiPonzio A., 2011. Geomagnetic Survey of Italy at 2010.0. *5th MagNetE Workshop on European geomagnetic repeat station survey 2009—2010. Rome 9—11 May 2011*. Program and abstract. P. 26—27.
- Duma G., Leichter B. and MagNet Group (Bayer T., Brkis M., Skontos A., De Santis A., Demetresku C., Dobrica V., Dominici G., Heida P., Horacek J., Korte M., Kultima J., Maksymchuk V., Manda M., Macmillan S., Orlyuk M., Pajunpaa K., Popeskov D., Shanatan T., Srebrov B., Sugar D., Sulakova L., Thebault E., Vaczyova M., Valach F., Vuyic E., Welker E.), 2012. Map of magnetic declination in Europe (2006). CCGM-CGMW. Paris, France. www.ccgm.Org. 1 p.
- Jankowski J., Sucksdorff Ch., 1996. Guide for magnetic measurements and observatory practice. Warsaw: International Association of Geomagnetism and Aeronomy Publ. 235 p.
- Korte M., Thébault E., 2007. Geomagnetic repeat station biases and vectorial anomaly maps for Germany. *Geophys. J. Int.* 170(1), 81—92.
- Maksymchuk V., Orlyuk M., Tregybenko V., Horodyskyi Y., Marchenko D., 2012. Ukrainian geomagnetic repeat station on work and results of the field work reduced to the epoch 2005.5. *Ann. Geophys.* 55(6), 1161—1165. doi:10.4401/ag-5406.
- Maksymchuk V., Orliuk M., Tregubenko V., Horodyskyi Yu., Nakalov Ye., Myasoyedov V., 2010. Results of the Geomagnetic survey on the Ukrainian repeat stations network for the 2005 year epoch. *Геофиз. журн.* Т. 32. № 4. С. 94—96.
- Manda M., Purucker M., 2005. Observing, modeling, and interpreting magnetic fields of the solid Earth. *Surv. Geophys.* 26(4), 415—459. doi:10.1007/s10712-005-3857-x.
- Newitt L. R., Barton C. E., Bitterly J. U., 1996. Guide for magnetic repeat station surveys. IAGA. Boulder. 112 p.
- Olsen N., Hulot G., Sabaca T. J., 2009. Treatise on Geophysics. Vol. 5. Geomagnetism. The present Field. Publ. Elsevier. P. 2646—2758.
- Orlyuk M. I., 2001. Investigations carried out with using the Ukrainian Observatory data. *Deep Electromagnetic Soundings of the Mantle around the Teisseyre-Tornquist Zone. NATO Advanced Research Workshop held at Belsk Duzy, Poland May 30 — June 2, 2001*. Abstracts Volume. Warszawa. P. 13—14.
- Orlyuk M., Romanets A., Sumaruk Yu., Sumaruk T., 2010. Space-temporal structure of the magnetic field in territory of Ukraine. *Геофиз. журн.* Т. 32. № 4. С. 126—127.
- Purucker M., 2011. Planetary magnetic fields of the solar system. Available at: <http://planetary-mag.net/index.html>.
- Thomson A., Baillie O., Beggan C., Clarke., Dawson., Flower S., Hamilton B., Harris T., Kelly G., Macmillan S., Reay S., Shanahan T., Turbitt C., 2013. Geomagnetism Review 2012. *British Geological Survey, Open Report OR/13/030*. 44 p.
- Verbanac G., Korte M., Manda M., 2007. On long-term trends in European geomagnetic observatory biases. *Earth Planet. Space* 59, 685—695.

Magnetic declination in the territory of Ukraine: the results of observations and calculations

© M. I. Orlyuk, A. A. Romanets, A. V. Marchenko, I. M. Orliuk, I. N. Ivashchenko, 2015

A method to calculate power and angular components of the Earth's magnetic field induction vector is proposed. This method is grounded on the development of 3D model of the Earth's crust and following calculation by it of northern (ΔB_{ax}), eastern (ΔB_{ay}) and vertical (ΔB_{az}) components of anomalous magnetic field that together with corresponding components (B_{0x} , B_{0y} , B_{0z}) of normal field enable to define full values of B_x -, B_y -, B_z -components of the Earth's magnetic field. Using them the value of horizontal component (B_H) as well as the angles of declination D and inclination J of geomagnetic field vector are calculated. The values of magnetic declination D on the territory of Ukraine for the epoch of year 2010 (is changing from -6 to $+20^\circ$) and secular variation for the period of years 2010—2015 (6,0—7,5 min/year) are calculated. The contribution into magnetic declina-

tion D of its normal (D_0) and anomalous (ΔD) components is estimated. The accuracy of calculated values D is appraised by means of comparison with the values of magnetic declinations measured at magnetic observatories and secular variation stations. For majority of stations the difference is within 3—6 minutes. At the present time the calculation results of magnetic declination D for the period of years 2010—2015 are used by state services of the Ukraine («UkSATSE», «Topographic service of MoD») to ensure flight security and to compile topographic maps.

Key words: magnetic declination, Ukraine, Earth's magnetic field components.

References

- Bloch Yu. I., 2012. Theoretical Foundations of complex magnetic survey. Moscow, 2012. 160 p. <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-complex.pdf> (in Russian).
- Gordin V. M., 2004. Essays on the history of geomagnetic measurements. Moscow: IPE RAS, 162 p. (in Russian).
- Entin V. A., Guskov S. I., Orlyuk M. I., Gintov O. B., Osmak R. V., 2015. Map of absolute values of the gravity field of Ukraine and some aspects of its possible interpretations. *Geofizicheskiy zhurnal* 37(1), 58—65 (in Russian).
- Karataev G. I., Karagodina O. I., 2008. Spatial and temporal characteristics of the magnetic declination in Belarus and practical aspects of monitoring. *Litasfera* (2), 219—222 (in Russian).
- Kovalenko-Zavoyskiy V. M., Ivaschenko I. M., 2006. Software of field interpretation of regional magnetic anomalies. *Geofizicheskiy zhurnal* 28(5), 18—30 (in Ukrainian).
- Krutihovska Z. O., Pashkevich I. K., Rusakov O. M., Solovyov V. D., 1973. Absolute ground magnetic survey the territory of the Ukrainian SSR. *Visnik AN URSR* (9), 101—102 (in Ukrainian).
- Krutikhovskaya Z. A., Pashkevich I. K., Silina I. M., 1982. Magnetic model and the structure of the crust of the Ukrainian shield. Kiev: Naukova Dumka, 216 p. (in Russian).
- The magnetic model of the lithosphere Europe. Ed. G. I. Karataev. Kiev: Naukova Dumka, 1990. 168 p. (in Russian).
- Maksimchuk V. Yu., Orlyuk M. I., Tregubenko V. I., Marchenko D. O., Nakalov E. F., Chobotok I. O., 2013. Results of measurements of the magnetic field component in the network of secular variation 2005—2010. *Geodynamika* (2), 219—222 (in Ukrainian).
- Nechaev S. V., 2006. Manual for stationary geomagnetic observations. Irkutsk: Publ. House of the Institute of Geography of the Siberian Branch of the RAS, 140 p. (in Russian).
- Nechaeva T. S., Shimkiv L. M., Gorkavko V. M., 2002. Map of the anomalous magnetic field (ΔT)_a Ukrainian. 1:1000 000. Kiev, 1 p. (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., 1996. Methodology and first results of the construction of a four-dimensional magnetic model of the earth's crust in Ukraine. *Dopovidi NAN Ukrainy* (5), 95—99 (in Russian).
- Orlyuk M. I., 2000. Spatial spatio-temporal models varying in structures continental lithosphere. *Geofizicheskiy zhurnal* 22(6), 148—165 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Kovalenko-Zavoyskiy V. N., Ivaschenko I. N., Marchenko A. V., 2008. Mathematical and software and algorithmic presentation and interpretation of regional magnetic anomalies with the sphericity of the Earth. *Theory and practice of geological interpretation of gravity, magnetic and electric fields: Proc. of the 35th session of the International Seminar behalf D. G. Uspenskiy (29 January — 3 February 2008, Ukhta)*. Syktyvkar, P. 231—234 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A. V., 2011. Development of 3D magnetic model of the crust of the East European Craton with the sphericity of the Earth. *Geodynamika* (2), 224—227 (in Ukrainian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A. V., Ivaschenko I. N., 2012. Concerning the calculation of the total value of the vector magnetic field of the Earth: *Proc. of the Second International Conference «Actual problems of electromagnetic sounding systems», 1—4 October 2012 Institute of Geophysics behalf S. I. Subbotin NAS of Ukraine, Kiev*. Conference CD-ROM Proceedings. P. 67—69 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Marchenko A. V., Ivaschenko I. N., 2014a. Calculation of geomagnetic field components on the example of Odessa magnetic anomaly. *Geodynamika* (1), 96—102 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Romanets A. A., 2005. New criterion for evaluating spatial and temporal disturbance of the magnetic field of the Earth, and some aspects of its use. *Geofizicheskiy zhurnal* 27(6), 1012—1023 (in Russian).
- Orlyuk M. I., Romanets A. A., Marchenko A. V., Bakarzhieva M. I., Lebed T. V., 2014b. Investigation of the dynamics of the geomagnetic field in the region of Chernihiv regional anomalies. *Vestnik Permskogo un-ta. Seriya «Geologiya»* (is. 3), 48—59 (in Russian).
- Romanets A. A., Orlyuk M. I., 2011. Three-dimensional magnetic model of the earth's crust north-western part of the Black Sea shelf. *Xth International Confe-*

- rence on Geoinformatics — Theoretical and Applied Aspects. 10—13 May 2011, Kiev, Ukraine. Paper 080. Conference CD-ROM Proceedings. 4 p. (in Russian).
- Starostenko V. I., Shuman V. N., Ivashchenko I. N., Legostaeva O. V., Savchenko A. S., Skrinik O. Ya., 2009. Magnetic field of three-dimensional anisotropic solids: theory and practice of computing. *Fizika Zemli* (8), 20—30 (in Russian).
- Starostenko V. I., Shuman V. N., Pashkevich I. K., Legostaeva O. V., Savchenko A. S., 2013. Recovery Methods of harmonic functions in the magnetic field and the ΔT function V. N. Strakhov ΔS : a review. *Fizika Zemli* (1), 151—160 (in Russian).
- Tregubenko V. I., Maksymchuk V. Yu., Orlyuk M. I., Myasoedov V. P., Marchenko D. O., Romanets A. O., 2013. Components of Earth's magnetic field on the territory of Ukraine for the epoch 2010 as measured in points secular variation. *Mineralni resursy Ukrainy* (3), 37—40 (in Ukrainian).
- Dominici G., Meloni A., Miconi M., DiPonzio A., 2011. Geomagnetic Survey of Italy at 2010.0. *5th MagNetE Workshop on European geomagnetic repeat station survey 2009—2010. Rome 9—11 May 2011*. Program and abstract. P. 26—27.
- Duma G., Leichter B. and MagNet Group (Bayer T., Brkis M., Skontos A., De Santis A., Demetresku C., Dobrica V., Dominici G., Heida P., Horacek J., Korte M., Kultima J., Maksymchuk V., Mandea M., Macmillan S., Orlyuk M., Pajunpaa K., Popeskov D., Shanatan T., Srebrov B., Sugar D., Sulakova L., Thebault E., Vaczyova M., Valach F., Vuyic E., Welker E.), 2012. Map of magnetic declination in Europe (2006). CCGM-CGMW. Paris, France. www.ccgm.org. 1 p.
- Jankowski J., Sucksdorff Ch., 1996. Guide for magnetic measurements and observatory practice. Warsaw: International Association of Geomagnetism and Aeronomy Publ. 235 p.
- Korte M., Thébault E., 2007. Geomagnetic repeat station biases and vectorial anomaly maps for Germany. *Geophys. J. Int.* 170(1), 81—92.
- Maksymchuk V., Orlyuk M., Tregybenko V., Horodyskyi Y., Marchenko D., 2012. Ukrainian geomagnetic repeat station on work and results of the field work reduced to the epoch 2005.5. *Ann. Geophys.* 55(6), 1161—1165. doi:10.4401/ag-5406.
- Maksymchuk V., Orliuk M., Tregubenko V., Horodyskyi Yu., Nakalov Ye., Myasoedov V., 2010. Results of the Geomagnetic survey on the Ukrainian repeat stations network for the 2005 year epoch. *Геофиз. журн.* Т. 32. № 4. С. 94—96.
- Mandea M., Purucker M., 2005. Observing, modeling, and interpreting magnetic fields of the solid Earth. *Surv. Geophys.* 26(4), 415—459. doi:10.1007/s10712-005-3857-x.
- Newitt L. R., Barton C. E., Bitterly J. U., 1996. Guide for magnetic repeat station surveys. IAGA. Boulder. 112 p.
- Olsen N., Hulot G., Sabaca T. J., 2009. Treatise on Geophysics. Vol. 5. Geomagnetism. The present Field. Publ. Elsevier. P. 2646—2758.
- Orlyuk M. I., 2001. Investigations carried out with using the Ukrainian Observatory data. *Deep Electromagnetic Soundings of the Mantle around the Teisseyre-Tornquist Zone. NATO Advanced Research Workshop held at Belsk Duzy, Poland May 30 — June 2, 2001*. Abstracts Volume. Warszawa. P. 13—14.
- Orlyuk M., Romanets A., Sumaruk Yu., Sumaruk T., 2010. Space-temporal structure of the magnetic field in territory of Ukraine. *Геофиз. журн.* Т. 32. № 4. С. 126—127.
- Purucker M., 2011. Planetary magnetic fields of the solar system. Available at: <http://planetary-mag.net/index.html>.
- Thomson A., Baillie O., Beggan C., Clarke, Dawson, Flower S., Hamilton B., Harris T., Kelly G., Macmillan S., Reay S., Shanahan T., Turbitt C., 2013. Geomagnetism Review 2012. *British Geological Survey, Open Report OR/13/030*. 44 p.
- Verbanac G., Korte M., Mandea M., 2007. On long-term trends in European geomagnetic observatory biases. *Earth Planet. Space* 59, 685—695.