

УДК 550.383.7:550.389.3(575.2)
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-4-192-198

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ ГЛАВНОГО ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ IGRF-13 ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КЫРГЫЗСТАНА

С.А. Имашев, Е.А. Лазарева

Аннотация. Приведены результаты расчета характеристик главного магнитного поля Земли по данным международной модели IGRF в текущей 13-й редакции, которая актуальна до 2025 г., и учитывает как данные наземных наблюдений, так и спутниковые и аэрографические измерения. Выделены особенности распределения характеристик главного магнитного поля для территории Кыргызстана. Значения полного вектора геомагнитного поля увеличиваются в северо-восточном направлении в диапазоне 52800–56000 нТл; магнитное склонение уменьшается в юго-восточном направлении и изменяется в диапазоне от 6° до 4°; магнитное наклонение варьируется в пределах от 60° до 63°, увеличиваясь равномерно в северном направлении. Вариации величины главного геомагнитного поля по модели IGRF-13 хорошо согласуются с данными наземных измерений, в качестве которых были использованы многолетние результаты наблюдений геомагнитного поля на базовой станции Ак-Суу, входящей в состав сети геомагнитного мониторинга Научной станции РАН.

Ключевые слова: геомагнитное поле; элементы геомагнитного поля; магнитное склонение; магнитное наклонение; полный вектор; модель IGRF-13; вековые вариации.

КЫРГЫЗСТАНДЫН АЙМАГЫ БОЮНЧА IGRF-13 МОДЕЛИНИН НЕГИЗИНДЕ БАШКЫ ГЕОМАГНИТТИК ТАЛААНЫН АЙМАКТЫК БӨЛҮШТҮРҮЛҮШҮ

С.А. Имашев, Е.А. Лазарева

Аннотация. Бул макалада учурдагы 13-басылышта IGRF эл аралык моделинин негизинде, Жердин башкы магнит талаасынын мүнөздөмөлөрүн эсептөө натыйжалары көрсөтүлгөн. Модель 2025-жылга чейин актуалдуу, жер, спутник жана аэрографиялык өлчөөлөрдүн маалыматтарын эске алат. IGRF-13 модели боюнча эсептөөлөр Кыргызстандын аймагы үчүн башкы магнит талаасынын мүнөздөмөлөрүн бөлүштүрүүнүн өзгөчөлүктөрүн бөлүп көрсөтүүгө мүмкүндүк берди. Тактап айтканда: толук геомагниттик талаа векторунун өлчөмү түндүк-чыгыш багытында 52800-56000 нТл диапазонунда өсөт; магниттик төмөндөө түштүк-чыгыш багытында 6 градустан 4 градуска чейин төмөндөйт, магниттик жантайыш 60 градустан 63 градуска чейин өзгөрүп, түндүк багытта бир калыпта өсөт. IGRF-13 модели боюнча башкы геомагниттик талаанын өлчөмүнүн вариациялары жер үстүндөгү өлчөөлөрдүн маалыматтары менен жакшы шайкеш келет. Россия Илимдер Академиясынын Илимий Станциясынын геомагниттик мониторинг тармагынын курамына кирген Ак-Суу базалык станциясындагы геомагниттик талаага байкоо жүргүзүүнүн көп жылдык натыйжалары жер бетиндеги өлчөө катары колдонулган.

Түйүндүү сөздөр: геомагниттик талаа; геомагниттик талаанын элементтери; магниттик төмөндөө; магниттик жантайыш; толук вектор; IGRF-13 модели; кылымдык вариациялар.

SPATIAL DISTRIBUTION OF THE MAIN GEOMAGNETIC FIELD COMPONENTS BASED ON IGRF-13 MODEL FOR KYRGYZSTAN TERRITORY

S.A. Imashev, E.A. Lazareva

Abstract. The paper is considered the results of calculating the characteristics of the Earth's main magnetic field according to the international IGRF model in the current 13th edition. The model is relevant until 2025 and takes into account data from ground, satellite and aerographic measurements. Calculations based on the IGRF-13 model allowed us to identify the features of the main magnetic field characteristics distribution for Kyrgyzstan territory. In particular: values of the total geomagnetic field increase in the north-east direction in the range from 52800 to 56000 nT; magnetic declination decreases in the south-easterly direction and varies in the range from 6° to 4°; magnetic inclination varies from 60° to 63°, increasing uniformly in the north direction. The main geomagnetic field variations according to the IGRF-13 model are in good agreement with ground-based measurements for which we used long-term observations of geomagnetic field at the Ak-Suu base station, which is part of the geomagnetic monitoring network of the Research Station of the Russian Academy of Sciences.

Keywords: geomagnetic field; geomagnetic field elements; magnetic declination; magnetic inclination; full vector; IGRF-13 model; secular variations.

Введение. Одним из основных свойств Земли является наличие у неё собственного магнитного поля, которое сложным образом изменяется во времени и пространстве. По гидродинамической гипотезе (динамо-эффект), основной причиной возникновения геомагнитного поля является образование циркулирующих электрических токов в ядре Земли [1]. Геомагнитное поле, как векторное поле, характеризуется вектором его напряженности T или ее составляющими. Поэтому геомагнитное поле обычно представляют так называемыми элементами земного магнетизма. В этих целях в прямоугольной системе координат (рисунок 1) вектор напряженности T в направлении магнитного меридиана раскладывают на две составляющие: горизонтальную H , действующую в горизонтальной плоскости, и вертикальную Z , перпендикулярную H . Горизонтальную составляющую можно разложить на северную X и восточную Y составляющие, соответственно направленные вдоль географического меридиана и перпендикулярно ему. Положение вектора T в пространстве характеризуется двумя углами составляющими земного магнетизма: магнитным склонением D и наклонением I . Принято считать, что там, где магнитная ось пересекает поверхность Земли, располагаются геомагнитные полюсы. В Северном полушарии располагается южный геомагнитный полюс, в Южном полушарии – северный. Магнитные и географические полюса Земли не совпадают друг с другом [2]. Магнитное склонение – это угол в горизонтальной плоскости между географическим и магнитным меридианами. Положительным склонением будет восточное, когда вектор H отклонен от севера к востоку, отрицательным – западное. Магнитное наклонение – угол между горизонтальной плоскостью и направлением полного вектора T . Наклонение будет положительным, когда вектор T направлен вниз от земной поверхности (Северное полушарие), отрицательное – при направлении T вверх (Южное полушарие). Величины H , Z , X , Y , D и I называются элементами земного магнетизма и представляют собой координаты конца вектора T в различных системах координат [1].

Измерения элементов земного магнетизма выполняют в стационарных и походных магнитных обсерваториях, а также в ходе специальных наземных, морских, воздушных и спутниковых магнитных съемок. Распределение основных элементов земного магнетизма по поверхности Земли изучают на основе моделей геомагнитного поля и магнитных карт, которые представляют собой семейство изолиний, т. е. кривых, соединяющих на карте точки равных значений элементов магнетизма, непрерывно изменяющихся во времени [2].

Данные. Международная модель главного магнитного поля Земли IGRF-13 (International Geomagnetic Reference Field) это последняя версия стандартного математического описания главного магнитного поля Земли, которая широко используется при исследованиях недр Земли, ее коры, ионосферы и магнитосферы [3]. В модель введен набор коэффициентов, описывающих крупномасштабную, изменяющуюся во времени часть внутреннего магнитного поля Земли. IGRF является продуктом



Рисунок 1 – Элементы земного магнетизма

совместных усилий разработчиков моделей магнитного поля и институтов, занимающихся сбором и распространением данных о магнитном поле со спутников и обсерваторий по всему миру. Она создается и поддерживается международной ассоциацией ученых в области геомагнетизма и аэронавтики IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy). Текущая 13-я редакция модели IGRF действительна с 1900 по 2025 год. Каждые 5 лет модель усовершенствуется, так например, если модель IGRF-11 насчитывала 120 коэффициентов, то текущая модель IGRF-13 содержит уже 195 коэффициентов [3]. Модель IGRF применима не только на поверхности Земли, но и за ее пределами, где главное магнитное поле может быть описано как градиент скалярного потенциала, $T = -\nabla V$, а функция потенциала $V(r, \theta, \phi, t)$ представляется как конечное разложение в ряд коэффициентов, также известных как коэффициенты Гаусса:

$$V(r, \theta, \phi, t) = a \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} [g_n^m(t) \cos(m\phi) + h_n^m(t) \sin(m\phi)] P_n^m(\cos\theta)$$

Здесь r – радиальное расстояние от центра Земли; θ и ϕ – широта и долгота соответственно; $a = 6371,2$ км – средний радиус Земли. Коэффициенты Гаусса g_n^m, h_n^m выражаются в нТл. Они непрерывно изменяются во времени и в модели IGRF-13 представлены с интервалом в 5 лет.

В данной работе в качестве входных параметров в модель закладывались: год – 2021.0, высота над уровнем моря – 0 км, диапазон координат по широте и долготу для земного шара и территории Кыргызстана с шагом $0,5^\circ$.

В настоящее время на Научной станции РАН одной из основных задач режимных геомагнитных наблюдений является выявление связи вариаций локального магнитного поля с деформационными процессами земной коры и вариациями других геофизических полей [4]. Для этой цели проводятся наблюдения вариаций модуля полного вектора геомагнитного поля, как на стационарных, так и на передвижных пунктах. Для измерения магнитного поля и его вариаций используется одна из разработок НС РАН – магнитовариационная модульная станция МВ-07, действующая на принципе ядерного резонанса, а также магнитометр ММПОС-1, основанный на эффекте Оверхаузера [5]. Оба магнитометра предназначены для измерения модуля геомагнитного поля и могут использоваться как для проведения пешеходных съемок, так и в качестве стационарной вариационной станции.

В данной работе были использованы значения многолетних измерений полного вектора геомагнитного поля по стационарному пункту Ак-Суу. Так как эта станция является базовой, на её примере можно проанализировать вариации магнитного поля Земли и на других станциях геомагнитного мониторинга, не учитывая их локальные особенности [4]. Для расчетов использовали исходные данные

с 1994 по 2021 г., с дискретизацией измерений 20 секунд и вычислением итоговых среднемесячных значений модуля полного вектора геомагнитного поля.

Результаты и обсуждения. На рисунке 2 приведены карты пространственного распределения магнитного склонения, наклонения и модуля индукции магнитного поля Земли по модели IGRF-13 для земного шара (слева) и территории Кыргызстана (справа). Напряженность геомагнитного поля на поверхности Земли колеблется от менее чем 30000 нТл в районе, включающем большую часть Южной Америки и Южной Африки, до более чем 60000 нТл вокруг магнитных полюсов на севере Канады и юге Австралии, а также в северо-восточной части Сибири. На карте глобального распределения величины магнитного поля также можно выделить область магнитных аномалий, называемую Южно-Атлантической [6]. Как видно на рисунке 2, значения полного вектора магнитного поля (Total intensity) для территории Кыргызстана увеличиваются в северо-восточном направлении в диапазоне 52800–56000 нТл. В среднем, значения магнитного склонения (Declination) для территории Кыргызстана составляют около 5°, а значения магнитного наклонения (Inclination) находятся в пределах 60–63°.

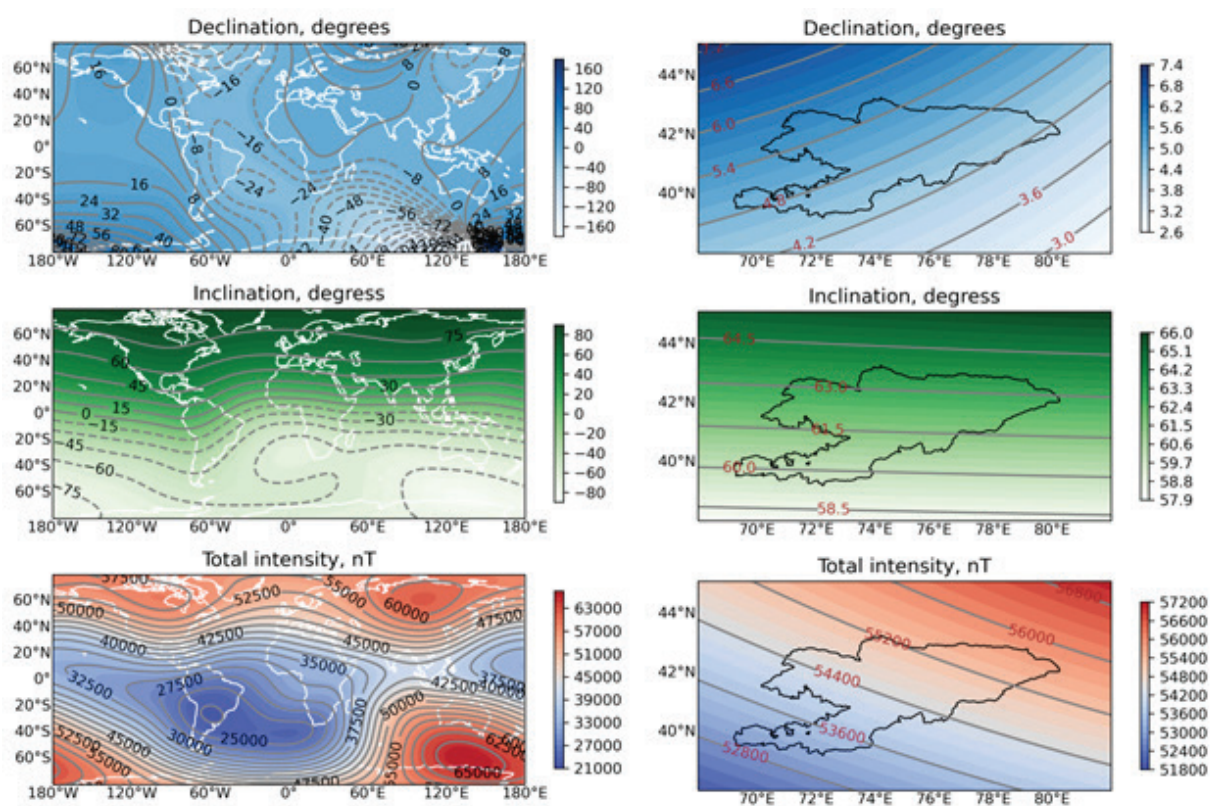


Рисунок 2 – Пространственное распределение величин магнитного склонения (Declination), наклонения (Inclination) и полного вектора (Total intensity) геомагнитного поля на начало 2021 г.: слева – для земного шара; справа – для территории Кыргызстана

В таблице 1 приведен фрагмент расчета параметров магнитного поля Земли по модели IGRF-13 для местоположения станции Ак-Суу за период с 1980 по 2024 г.

Вычисление значений элементов магнитного поля Земли по этой модели показало значительное изменение характера его векового хода (рисунок 3). Так, например, с 1991 г. значения полного вектора непрерывно увеличиваются в среднем на величину от 5 до 20 нТл в год, а общее увеличение

Таблица 1 – Данные магнитного поля по модели IGRF-13 для местоположения станции Ак-Суу (42.6103 N, 74.0099 E) за период 1980–2024 гг.

| Год | Склонение, град. | Наклонение, град. | H, нТл | T, нТл | X, нТл | Y, нТл | Z, нТл |
|---------|------------------|-------------------|---------|---------|---------|--------|---------|
| 1980 | 4.51665 | 61.51098 | 25555.5 | 53576.5 | 25476.1 | 2012.5 | 47088.8 |
| 1980.25 | 4.51985 | 61.51741 | 25547.9 | 53571.8 | 25468.5 | 2013.3 | 47087.5 |
| 1980.5 | 4.52304 | 61.52383 | 25540.4 | 53567.1 | 25460.9 | 2014.1 | 47086.3 |
| 1980.75 | 4.52624 | 61.53026 | 25532.9 | 53562.4 | 25453.3 | 2014.9 | 47085 |
| *** | | | | | | | |
| 2024 | 5.4569 | 63.38208 | 24714.3 | 55161.1 | 24602.3 | 2350.3 | 49314.8 |
| 2024.25 | 5.46136 | 63.40085 | 24708.2 | 55183.6 | 24596.1 | 2351.6 | 49343 |
| 2024.5 | 5.46583 | 63.41961 | 24702.1 | 55206.1 | 24589.8 | 2352.9 | 49371.2 |
| 2024.75 | 5.4703 | 63.43835 | 24696 | 55228.6 | 24583.6 | 2354.3 | 49399.4 |

На рисунке 3 приведены временные ряды изменения характеристик магнитного поля Земли, рассчитанные по модели IGRF-13 для координат станции Ак-Суу за 1980–2024 гг.

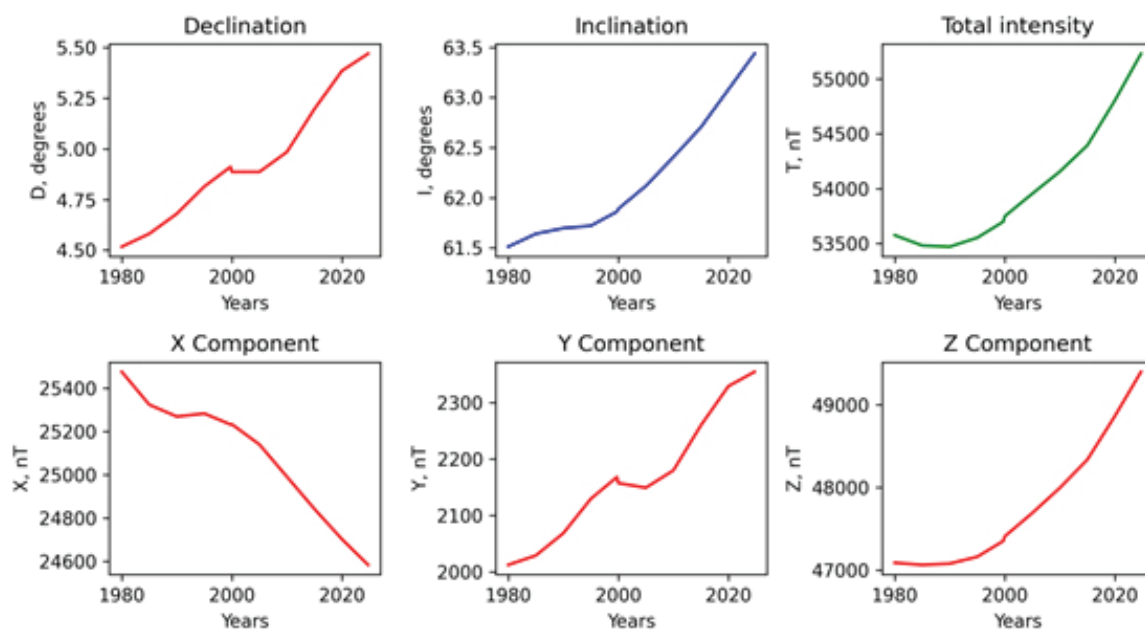


Рисунок 3 – Временные вариации характеристик геомагнитного поля для местоположения станции Ак-Суу за период с 1980 по 2024 г. по модели IGRF-13

за рассматриваемый период наблюдений (1980–2024 гг.) составляет ~1650 нТл. Как видно на рисунке 3, элементы магнитного поля увеличиваются в среднем на 1° для склонения и на 2° – для наклонения. Несмотря на значительное уменьшение X-компоненты (в среднем на 890 нТл) за указанный период, величина результирующего вектора **T** непрерывно увеличивается за счет вертикальной компоненты магнитного поля **Z**. Значения Y-компоненты за рассматриваемый период увеличиваются в среднем на 340 нТл, где непрерывный рост прерывается в промежутке 2000–2005 гг.

Кроме данных, полученных с помощью модели IGRF-13, характер изменения векового хода можно проследить и на других моделях магнитного поля: EMM (Enhanced Magnetic Model) и WMM (World Magnetic Model) [7, 8]. Для сравнения хода вековых вариаций были выбраны данные по наземной станции геомагнитных наблюдений (Ак-Суу), а также данные по этим двум моделям. Результаты сравнения вариаций представлены на рисунке 4. Для наглядности сравнения, при построении графиков на станции Ак-Суу была исключена локальная составляющая. На графиках видно, что наземные измерения хорошо согласуются с данными, полученными по моделям IGRF-13 и EMM. Значительный рост значений полного вектора геомагнитного поля с увеличением скорости нарастания наблюдается с 2015 года. Это отражается как на вариациях геомагнитного поля по данным наземных измерений, так и на данных моделей IGRF-13 и EMM.

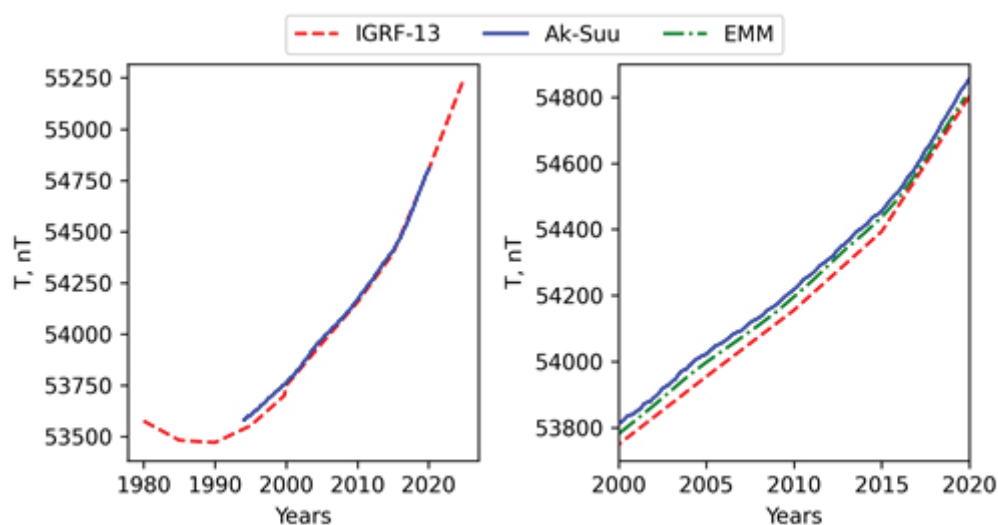


Рисунок 4 – Вариации модуля индукции магнитного поля Земли по данным наземной станции Ак-Суу (синяя сплошная), моделей IGRF-13 (красная штриховая) и EMM (зеленая штрихпунктирная)

Заключение. Пространственное распределение величин геомагнитного поля для территории Кыргызстана показало, что значения полного вектора геомагнитного поля увеличиваются в северо-восточном направлении (от 52800 до 56000 нТл), магнитное склонение уменьшается к юго-востоку ($6-4^\circ$), а магнитное наклонение равномерно увеличивается в северном направлении ($60-63^\circ$). Величина результирующего вектора геомагнитного поля определяется в основном его вертикальной составляющей. Вариации главного магнитного поля по моделям IGRF-13 и EMM, в частности его величина, хорошо согласуются с многолетними данными наземных измерений, проводимых на базовой станции Ак-Суу сети геомагнитного мониторинга ИС РАН.

Результаты, представленные в данной работе, получены в рамках выполнения государственного задания Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (тема АААА-А19-119020190064-9).

Поступила: 03.03.22; рецензирована: 15.03.22; принята: 18.03.22.

Литература

1. Гвишиани А.Д. Геомагнетизм: от ядра Земли до Солнца / А.Д. Гвишиани, Р.Ю. Лукьянова, А.А. Соловьёв. М.: РАН, 2019. 186 с.
2. Campbell W.H. Introduction to Geomagnetic Fields / W.H. Campbell. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 352 p. DOI:10.1017/CBO9781139165136.

3. *Alken P.* International Geomagnetic Reference Field: the 13th generation / P. Alken, E. Thébault, C.D. Beggan et al. // *Earth Planets Space*. 2021. Vol. 73. N. 49. URL: <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01288-x>
4. *Мухамадеева В.А.* Опыт проведения геомагнитных наблюдений на Бишкекском Геодинамическом Полигоне / В.А. Мухамадеева, Е.В. Воронцова, Е.А. Лазарева // *Вестник КPCУ*. 2015. Т. 15. № 3. С. 130–133.
5. *Sapunov V.* Proton and Overhauser Magnetometers Metrology / V. Sapunov, A. Denisov, O. Denisova, D.V. Saveliev // *Contributions to Geophysics & Geodesy*. 2001. 31. Pp. 119–124.
6. *Hartmann G.A.* Time evolution of the South Atlantic magnetic anomaly / G.A. Hartmann, I.G. Passa // *An. Acad. Bras. Cienc.* 2009. 81. Pp. 243–255.
7. *Woods A.* New software for the World Magnetic Model (WMM) / A. Woods, M. Nair, S. Maus, S. J. McLean // *American Geophysical Union*. 2009. Vol. 2009.
8. *Oehler J.F.* Comparison of global geomagnetic field models and evaluation using marine datasets in the north-eastern Atlantic Ocean and western Mediterranean Sea / J.F. Oehler, D. Rouxel, M.F. Lequentrec-Lalancette // *Earth Planets Space*. 2018. Vol. 70. N. 99. URL: <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0872-y>.