

УДК 550.383+550.389

## КАРТОГРАФИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

**В.Т. Минлигареев, А.В. Алексеева, Ю.М. Качановский, В.В. Трегубов**

*Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова  
(ФГБУ «ИПГ»), Москва  
metrologo@mail.ru*

*В публикации приведены теоретические данные о составляющих магнитного поля Земли, смещении магнитных полюсов и международных моделях главного магнитного поля Земли. Проведён анализ карт аномального магнитного поля Земли (АМПЗ), показаны результаты и перспективы картографического и программного обеспечения магнитных навигационных систем (МНС). Область применения полученных результатов картографического и программного обеспечения – создание геоподосновы МНС, а также централизация и использование цифровой картографической продукции (баз данных) для геологоразведочных работ, различных исследований в области наук о Земле.*

*Ключевые слова: аномальное магнитное поле Земли (АМПЗ), картографическое обеспечение, программное обеспечение, карты АМПЗ, магнитометрические навигационные системы, базы данных.*

## CARTOGRAPHIC SOFTWARE OF PERSPECTIVE MAGNETOMETRIC NAVIGATION SYSTEMS

**V.T. Minligareev, A.V. Alekseeva, Yu.M. Kachanovsky, V.V. Tregubov**

*Institute of Applied Geophysics named after Academician E.K. Fedorov, Moscow  
metrologo@mail.ru*

*The publication provides theoretical data on the components of the Earth's magnetic field, the displacement of magnetic poles and international models of the Earth's main magnetic field. The analysis of maps of the Earth's anomalous magnetic field (AMPS) is carried out, the results and prospects of the cartographic software of magnetic navigation systems (MNS) are shown. The scope of the obtained results of cartographic software is the creation of a geo-basis of the MNS, as well as the centralization and use of digital cartographic products (databases) for exploration, various studies in the field of Earth sciences.*

*Key words: anomalous magnetic field of the Earth, cartographic software, software, maps of AMPS, magnetometric navigation systems, database.*

В связи с возрастающими потенциальными угрозами несанкционированных воздействий и влиянием космической погоды на технические средства и системы в настоящее время активно развиваются методы и средства коррекции навигационных параметров летательных аппаратов и подводных движущихся объектов по информации о физических полях Земли. Методы коррекции реализуются в корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭНС), в том числе с использованием параметров аномальной составляющей магнитного поля Земли. Основными преимуществами КЭНС являются автономность и точность определения навигационных параметров в режиме реального времени, независимо от внешнего воздействия.

Применение методов экстремальной коррекции, прежде всего по магнитному полю Земли (МПЗ), потребовало дополнительных исследований, связанных с адаптацией алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки для летательных аппаратов, а также с комплексным использованием картографического и программного обеспечения [1–3]. На основании таких исследований необходима разработка рекомендаций по применению цифровых карт МПЗ для их применения в магнитометрических навигационных системах (МНС).

Выделение АМПЗ из наблюдаемого или суммарного МПЗ и использование их в виде карт, баз цифровых данных, с целью навигации является геоподосновой создания перспективных МНС и КЭНС в целом. Необходимо отметить, что на сегодняшний день единых специализированных баз данных АМПЗ не существует.

По современным представлениям МПЗ в любой точке земной поверхности и в околоземном пространстве можно представить в виде трех составляющих: *главного (нормального) поля, полей вариаций и магнитных аномалий* (АМПЗ). Для выделения АМПЗ используют информацию о главном поле и вариациях.

*Определение главного поля* производится по различным моделям, основными из которых являются: IGRF (International geomagnetic reference field), WMM (World Magnetic Model). Вышеперечисленные модели используются по всему миру, в том числе и в России.

До 2019 г. для расчета главного поля использовались модели для эпохи 2015 г. Скорость дрейфа северного магнитного полюса в 70-х годах составила 10 км/год, 2001 г. - 40 км/год, 2004 г. - 60 км/год, 2015 г. – 48 км/год. Однако, с 2016 г. необычно большая скорость, с которой смещается северный магнитный полюс Земли, привела к серьезным ошибкам. В начале 2019 г., неувязка определения Северного полюса составила 40 км. Для устранения такого рода ошибок с начала 2019 г. началось досрочное обновление моделей МПЗ. В феврале WMM - Национальным геофизическим центром данных США (NGDC), в декабре - Международной ассоциацией геомагнетизма

и аэрономии (IAGA) - выпущена очередная версия модели – IGRF-13. Данные модели необходимы для функционирования профессиональных навигационных систем и бытовых навигаторов в мобильных телефонах. С меньшими скоростями и несоосно изменялось и положение южного магнитного полюса (рис.1).

В настоящее время проходит экспедиция на океанографическом исследовательском судне (ОИС) «Адмирал Владимирский», одной из задач которой было инструментальное определение координат Южного магнитного полюса в море Дюрвиля (около Земли Адели Антарктиды) и определение неувязки по мировым моделям. Данную задачу на ОИС решает объединённая геофизическая группа Института прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ»), МГУ им. М.В. Ломоносова, ИЗМИРАН и Южморгеологии при поддержке Русского географического общества. Последний раз определение южного магнитного полюса было в 2000 г. Австралийской геологической службой (рис.1)

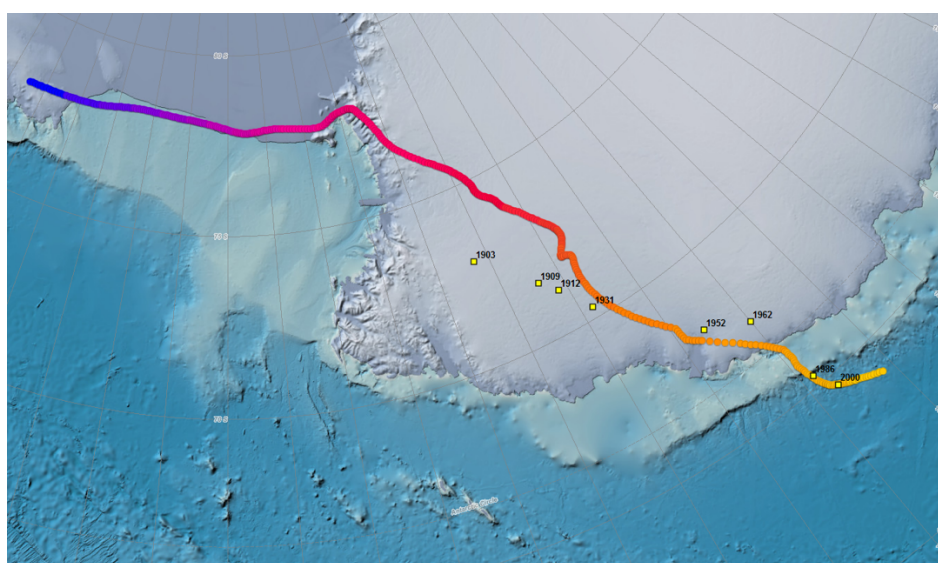


Рис. 1. Смещение южного магнитного полюса. Желтыми квадратами обозначены места инструментального определения магнитного полюса (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>)

Источники поля быстро *меняющихся вариаций МПЗ* находятся в ионосфере, магнитосфере и частично в земной коре. Вклад поля вариаций в общее МПЗ может достигать 5-10 % и определяется по данным сети магнитовариационных станций, основной из которых является Государственная наблюдательная сеть Росгидромета. Головным учреждением по магнитным наблюдениям на Государственной наблюдательной сети является ФГБУ «ИПГ», г. Москва. [4].

Аномальная составляющая магнитного поля Земли  $\Delta T_a$  – магнитное поле региональных и локальных магнитных аномалий, источники которого находятся в земной коре (рис. 2). Это поле обусловлено намагниченностью пород земной коры, отражает распределение магнитных масс в земной коре и связано с ее геологическим строением. Это наиболее стабильная во времени составляющая магнитного поля, которая может измениться только в результате тектонических процессов. Именно в качестве геоподосновы навигации рассматривается аномальная составляющая магнитного поля – АМПЗ, которая является составной частью общего МПЗ.

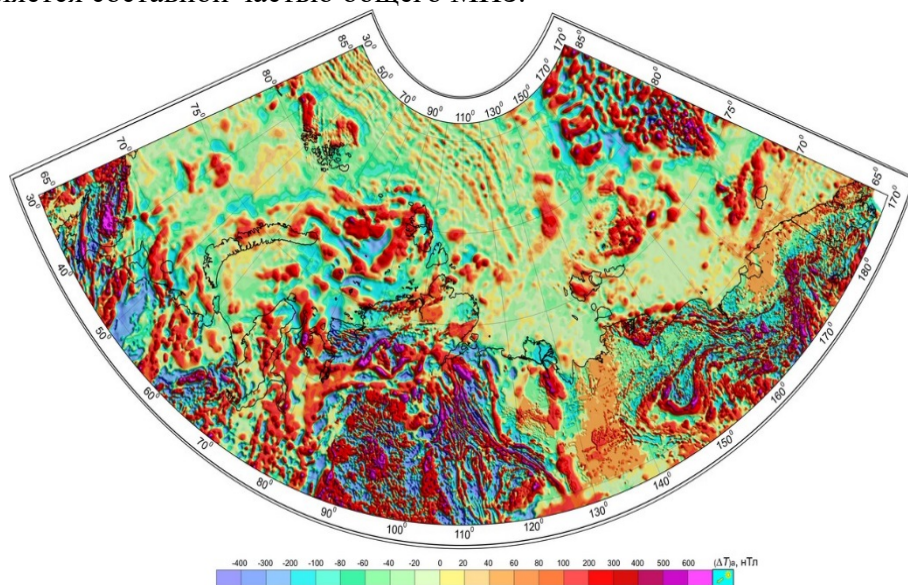


Рис. 2. Аномальное магнитное поле Российской Арктики

В отличие от поверхностных полей (рельеф местности, радиотепловое и радиолокационное) пространственные (*магнитное*, гравитационное) являются глобальными, трехмерными и зависящими от высоты.

Известно, что с ростом высоты меняется характер АМПЗ – неоднородно уменьшается полезный сигнал, сначала ослабевает высокочастотная составляющая, затем – низкочастотная. Поэтому необходимо знать модуль или вектор АМПЗ в любой точке по эшелонам высот. Для этого разрабатываются различные программы пересчета АМПЗ по высоте (Geosoft, REIST и др.) [5-8]. Вариация расчетных характеристик АМПЗ проводится практической проверкой с пролетом на всех эшелонах исследуемого участка [9].

Кроме того, под задачи навигации, как правило, разрабатываются вспомогательные программы:

- запроса данных из баз АМПЗ и визуализации результатов;
- записи данных АМПЗ;

- пересчета АМПЗ по высотам (глубинам);
- входного контроля картографической информации с визуализацией АМПЗ.

Как уже было отмечено, единых специализированных баз данных АМПЗ не существует. Особенностью наполняемости баз геоданных является то, что за период выполнения магнитных съемок, охватывающий несколько десятилетий МПЗ, значительно изменяется, и соответственно необходимо периодическое обновление баз данных АМПЗ.

Проведённый анализ изученности территории страны по данным картографирования в части АМПЗ показал следующее:

- карты АМПЗ территории Российской Федерации были составлены до введения в аэрогеофизическую практику в 90-х годах XX века системы спутниковой навигации и являются устаревшими. Для 80-90 % существующей картографической продукции отсутствует исходный материал в цифровом формате [5-8];

- определение АМПЗ на территории страны с использованием современной магнитоизмерительной аппаратуры и спутниковой навигации относительно нормального магнитного поля модели IGRF выполнено фрагментарно. Порядка 10–20 % территории страны может быть использовано для геоподосновы МНС [5-8].

Современное картографирование больших площадей (построение карт АМПЗ) проводится в основном с помощью аэромагнитных съемок с применением феррозондовых и квантовых магнитометров, которые определяют модуль магнитной индукции (в нТл) на высоте съемки. Одновременно с помощью навигационных систем, установленных на носителе, определяется высота и координаты маршрута полета (рис. 3.).



Рис. 3. Летающая лаборатория на базе Ан-30Д, ведущая съемки АМПЗ на различных эшелонах высот. Магнитные датчики вынесены в немагнитный стингер

После первичной и камеральной обработки строятся карты АМПЗ по высоте съемки с цифровыми массивами данных (широта, долгота, значение модуля АМПЗ  $\Delta T_a$ ).

Для создания баз цифровых данных для автономной навигации в КЭНС проработаны алгоритмы верификации данных, перевода модуля магнитной индукции в модуль пересчета характеристик АМПЗ по высоте в верхнее и нижнее полупространство.

Для проверки разработанных алгоритмов необходима их экспериментальная апробация на самолетах-лабораториях и БПЛА. Отдельно стоит вопрос экспериментальной апробации автономной навигации по АМПЗ для подводных объектов. Здесь вопрос может решаться с помощью автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА).

Таким образом, для обеспечения разработки КЭНС с использованием МНС необходимо:

1. Создание цифровых баз банных АМПЗ с проведением верификации и валидации данных.
2. Разработка программного обеспечения по входному контролю, визуализации характеристик АМПЗ.
3. Проведение комплексной геофизической (гравитационной, магнитной) съемки для отдельных участков, включающей высокоточную аэромагнитную компонентную съемку специализированной геофизической авиацией.
4. Для проведения исследований работоспособности МНС в КЭНС необходимо создание геофизического полигона с высоко-, средне- и высокоинформативными участками АМПЗ и современным высокоточным картографированием.
5. Разработка технологий для программного и цифрового картографического обеспечения МНС АНПА.

Область применения полученных результатов – это прежде всего создание геоподосновы автономных навигационных систем, а также централизация и использование цифровой картографической продукции для геолого-разведочных работ, различных исследований в области наук о Земле.

### **Литература**

1. Джанджгава Г.И., Августов Л.И. Навигация по геополям. Научно – методические материалы. – М.: ООО «Научтехлитиздат». – 2018. – 296 с.
2. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
3. Бочкарев А.М. Корреляционно-экстремальные системы навигации (обзор) // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 9.

4. РД 52.04.567-2003. Положение о Государственной наблюдательной сети. – Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2003.
5. Минлигареев В.Т., Алексеева А.В., Качановский Ю.М. др. Картографическое обеспечение альтернативной навигации по геофизическим полям Земли // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 11. С .18-22. DOI: 10.25791/aviakosmos.11.2018.258.
6. Минлигареев В.Т., Качановский Ю.М., Паньшин Е.А. и др. Перспективы картографического обеспечения аномальной составляющей магнитного поля Земли для решения прикладных задач // Гелиогеофизические исследования: научный электронный журнал. 2018. № 20. С. 71-75. URL: <http://www.vestnik.geospace.ru>. (дата обращения: 31.01.2019).
7. Минлигареев В.Т., Качановский Ю.М., Трегубов В.В. и др. Картографическое обеспечение авиационных магнитометрических навигационных систем // VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки» – «АВИАТОР». Сборник пленарных докладов. 14–15 февраля 2019 г. – ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, 2019. С. 8-12.
8. Минлигареев В.Т., Репин А.Ю., Хотенко Е.Н. и др. Картографическое обеспечение магнитометрических навигационных систем робототехнических комплексов//Известия ЮФУ. Технические науки. Тем. вып. «Перспективные системы и задачи управления». – Ростов-на-Дону, 2019. № 1 (203). С. 248-258.
9. Цирель В.С. Аэромагнитометрия – от А.А. Логачева до наших дней // Геофизика. 1999. № 2. С. 4-6.