

УДК 621.396.988:537

DOI 10.17285/0869-7035.0052

В. Т. МИНЛИГАРЕЕВ, Т. В. САЗОНОВА, Д. А. АРУТЮНЯН,
В. В. ТРЕГУБОВ, Е. Н. ХОТЕНКО

ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВТОНОМНЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье обосновывается актуальность геофизического обеспечения автономных магнитометрических навигационных систем, приводятся теоретические данные о составляющих магнитного поля Земли и анализируется смещение магнитных полюсов в международных моделях главного магнитного поля Земли. Обсуждаются перспективы картографического и программного обеспечения магнитометрических навигационных систем (МНС). Описываются результаты летных исследований экспериментального образца МНС, которые применяются при создании и управлении базами данных для МНС, централизации и использовании цифровой картографической продукции для геологоразведочных работ, а также в ходе различных исследований в области наук о Земле.

Ключевые слова: магнитометрические навигационные системы, геофизическое обеспечение, аномальное магнитное поле Земли (АМПЗ), карты АМПЗ, базы данных, корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС).

Введение

Основным средством автономной навигации для контроля пространственного положения и угловой ориентации подвижных технических средств (наземных, воздушных, морских, космических) в настоящее время является инерциальная навигационная система (ИНС). С ее помощью вырабатываются координаты, скорость, ускорение и угловое положение аппаратов относительно вертикали места. Одно из главных достоинств ИНС – это автономность работы. Недостаток – нарастающие со временем погрешности в определении навигационных параметров. По этой причине показания ИНС, как правило, корректируются по данным глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и радиотехнических систем ближней и дальней навигации (РСБН, РСДН) [1–5].

Начавшееся в конце прошлого века бурное развитие ГНСС ГЛОНАСС, GPS и других привело к снижению интереса к активно разрабатываемым в то время системам автономной навигации по геофизическим полям [6–11].

Минлигареев Владимир Тимурович. Доктор технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, почетный метролог, Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова (ФГБУ «ИПГ», Москва).

Сазонова Татьяна Владимировна. Доктор технических наук, главный конструктор, АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (г. Раменское Московской обл.).

Арутюнян Давид Артурович. Младший научный сотрудник, ФГБУ «ИПГ».

Трегубов Вадим Валентинович. Начальник сектора, ФГБУ «ИПГ».

Хотенко Елена Николаевна. Кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, ФГБУ «ИПГ».

Тем не менее в связи с потенциальными угрозами несанкционированного воздействия и влиянием космической погоды на технические средства и системы навигации в настоящее время внимание разработчиков вновь привлекают активно развивающиеся методы и средства коррекции навигационных параметров систем позиционирования летательных аппаратов (ЛА) и автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) по информации о физических полях Земли [12–14]. Методы корреляционно-экстремальной навигации реализуются в том числе и с использованием параметров аномальной составляющей магнитного поля Земли [11–15]. В зарубежных работах [12, 13] обосновывается актуальность методов автономной навигации по магнитному полю Земли (МПЗ) на современном уровне развития технологий съемки.

Основными преимуществами навигации по геофизическим полям являются автономность работы и точность определения навигационных параметров в режиме реального времени независимо от внешнего воздействия. Это особенно актуально в области авиационной и морской навигации. Применение методов корреляционно-экстремальной коррекции, прежде всего по МПЗ, потребовало дополнительных исследований, связанных в том числе и с адаптацией алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки для движущихся объектов, а также с комплексным использованием картографического и программного обеспечения [7–13]. В работе [13] обсуждается применение цифровых карт АМПЗ для коррекции работы ИНС в целях навигации ЛА, а также цезиевых магнитометров с оптической накачкой для векторных измерений параметров МПЗ по результатам экспериментальных полетов.

В настоящей статье авторы развивают идеи, изложенные в [11]. Обосновывается актуальность геофизического обеспечения автономных МНС, приводятся теоретические данные о составляющих МПЗ, анализируется смещение магнитных полюсов в международных моделях главного магнитного поля Земли. Кроме того, описываются перспективы совершенствования картографического и программного обеспечения МНС и результаты летных исследований экспериментального образца такой системы.

Структура магнитного поля Земли

По современным представлениям МПЗ в любой точке земной поверхности и в околоземном пространстве можно представить в виде трех составляющих: главного (нормального) поля (рис. 1), полей вариаций и магнитных аномалий (рис. 2):

$$T = T_0 + T_m + \Delta T_a + \delta T, \quad (1)$$

где T_0 – дипольная составляющая главного поля (однородная намагниченность Земли); T_m – недипольная составляющая главного поля (взаимодействие внутренних оболочек Земли – поле мировых аномалий);

ΔT_a – АМПЗ (обусловлено намагниченностью верхних частей земной коры);

δT – магнитное поле вариаций (внешние воздействия на Землю – от солнечных вспышек до галактических космических лучей).

Источники главного магнитного поля находятся в земном ядре. Вклад главного поля в МПЗ для большинства районов Земли является определяющим и варьируется от 80 до 98%. Исследования показали, что главное поле изменяется со време-

нем, для него характерно наличие вековых вариаций. Определение главного поля производится по международным моделям, из которых основными являются IGRF (International Geomagnetic Reference Field) и WMM (World Magnetic Model) [16–19].

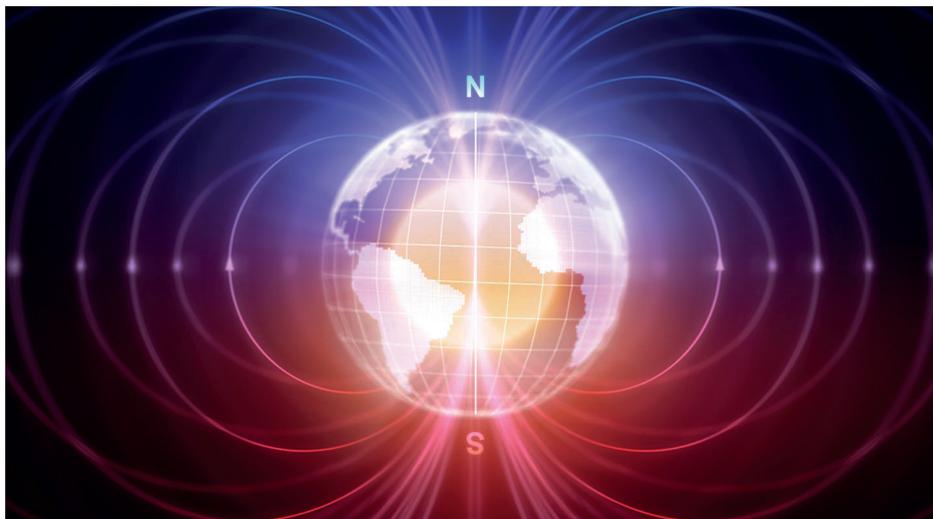


Рис. 1. Главное магнитное поле Земли

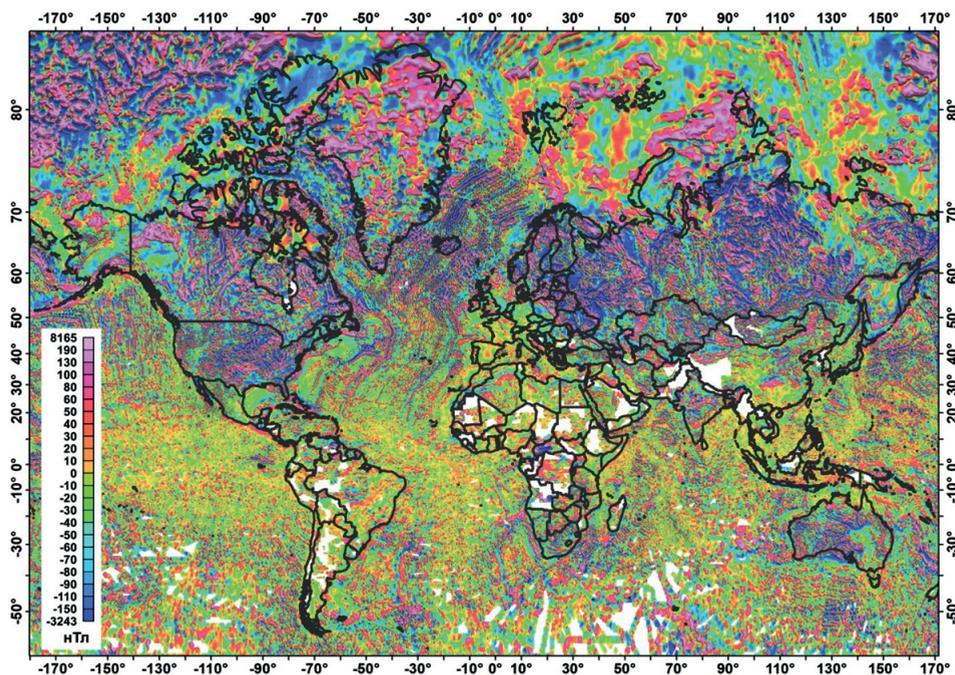


Рис. 2. Мировая карта АМПЗ ΔT_a . Сводная модель АМПЗ EMAG2

До 2019 г. для расчета главного поля использовались модели эпохи 2015 г. Дрейф магнитных полюсов наблюдался во все эпохи. Скорость дрейфа северного магнитного полюса (СМП) в 70-х годах составила 10 км/год, 2001 г. – 40 км/год, 2004 г. – 60 км/год, 2015 г. – 48 км/год. С 2016 г. необычно большая скорость, с которой смещается северный магнитный полюс Земли, привела к серьезным погрешностям фик-

сации положения СМП. В начале 2019 г. невязка определения положения Северного полюса относительно мировых моделей МПЗ составила 40 км.

С меньшими скоростями и несоосно изменялось и положение Южного магнитного полюса (ЮМП) (рис. 3). Скорость дрейфа ЮМП в 70-х годах прошлого века составляла 15 км/год, в 2000 г. – 10 км/год, в 2015 г. – 16 км/год, в 2016 г., 2019 г. – 33 км/год. Для устранения соответствующих невязок с начала 2019 г. были начаты работы по обновлению моделей МПЗ. В феврале Национальным геофизическим центром данных США (NGDC) была обновлена модель WMM, в декабре Международной ассоциацией геомагнетизма и аэронавигации (IAGA) выпущена очередная версия модели IGRF – IGRF-13.

Эти модели необходимы для функционирования как профессиональных навигационных систем, так и бытовых навигаторов, в том числе для мобильных телефонов. Последний раз инструментальное определение положения ЮМП проводилось в 2000 г. австралийской геологической службой.

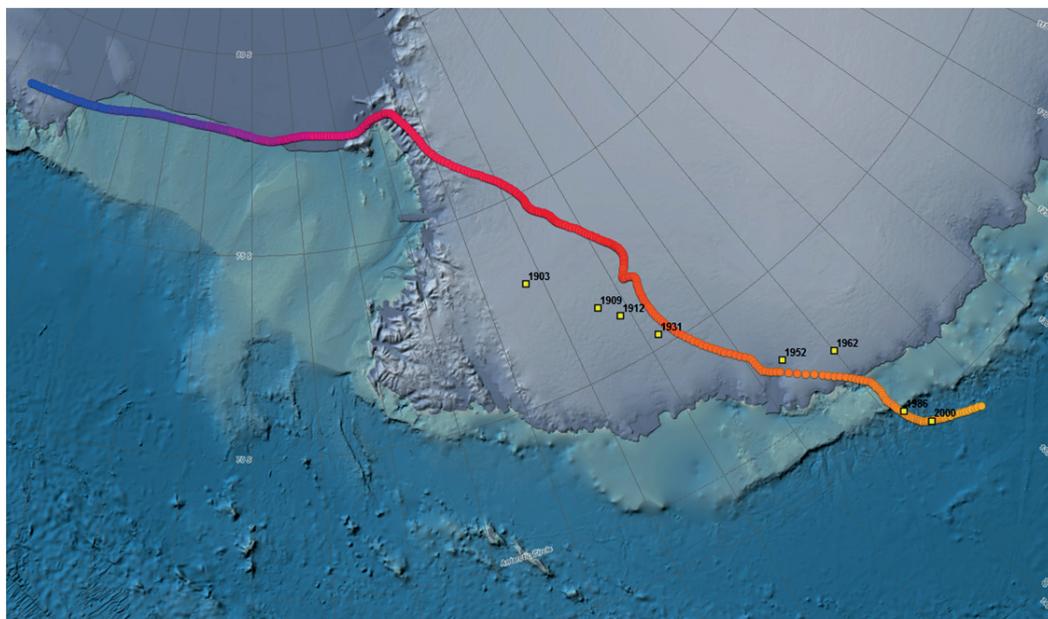


Рис. 3. Смещение южного магнитного полюса. Желтыми квадратами обозначены места инструментального определения положения магнитного полюса (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>)

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 в России определяется по данным сети магнитовариационных станций различных ведомств (Росгидромета, РАН, Минобрнауки и др.). Основной является государственная наблюдательная сеть Росгидромета, головным учреждением по магнитным наблюдениям с ее использованием – Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Росгидромета (ФГБУ «ИПГ», Москва).

АМПЗ – магнитное поле региональных и локальных магнитных аномалий (см. рис. 2), обусловленное намагниченностью пород земной коры, отражает распределение магнитных масс в земной коре и связано с ее геологическим строением. Аномальная составляющая – наиболее стабильная во времени составляющая магнитного поля, которая может измениться только в результате тектонических процессов

или широкомасштабной антропогенной деятельности (например, при разработке полезных ископаемых, строительстве крупных железобетонных сооружений, заводов, протяженных трубопроводов, линий электропередач).

С учетом сказанного именно АМПЗ используется в качестве геофизической основы для создания цифровых карт с возможностью применения их в целях навигации. Исследование АМПЗ проводится в ходе наземных, аэромагнитных и морских экспедиций.

В 2019–2020 гг. состоялась третья кругосветная экспедиция на океанографическом исследовательском судне (ОИС) ВМФ «Адмирал Владимирский», задачами которой были в том числе определение параметров АМПЗ участков Мирового океана, инструментальное определение координат ЮМП в море Дюрвиля (около Земли Адели, Антарктида) и определение невязки положения ЮМП по мировым моделям главного магнитного поля [20]. Эту задачу на ОИС решала объединенная межведомственная геофизическая группа ФГБУ «ИПГ», МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбФ ИЗМИРАН и АО «Южморгеология» при поддержке Русского географического общества (рис. 4 и 5).



Рис. 4. ОИС «Адмирал Владимирский» у берегов Антарктиды, 2020 г.



Рис. 5. Проведение работ по измерению параметров МПЗ в море Дюрвиля

Геофизическое обеспечение магнитометрических навигационных систем

Использование свойств пространственных геофизических полей для автоматической коррекции траектории движения ЛА и АНПА предусматривает корреляционный способ обработки геофизической информации, к которой, в частности, относятся и значения гравитационного или магнитного полей в точках измерения. Методы геофизической навигации реализуются с помощью геоинформационных навигационных систем, которые, как правило, решают следующие задачи:

- определение параметров поступательного и углового движения носителя относительно заданной системы отсчетов;
- уточнение параметров навигационных геофизических полей;
- осуществление коррекции погрешностей датчиков полей, датчиков угловой ориентации и других устройств, входящих в состав навигационной системы [6–15].

Как было отмечено ранее, одним из перспективных направлений развития геоинформационных навигационных систем для автономной навигации является использование АМПЗ. В отличие от поверхностных полей (рельеф местности, радиотепловое, радиолокационное) пространственные (магнитное, гравитационное) являются глобальными, трехмерными и зависят от высоты [6–13]. Известно, что с увеличением высоты меняется характер АМПЗ – неоднородно уменьшается полезный сигнал: сначала ослабевает высокочастотная составляющая, затем низкочастотная. По этой причине необходимо знать значения модуля АМПЗ в любой точке по эшелонам высот. Для этого разрабатываются различные программы пересчета АМПЗ по высоте (Geosoft, REIST и др.) [10, 11, 21]. Вариация расчетных характеристик АМПЗ выявляется путем практической проверки с пролетом по всему исследуемому участку на самолетах специальной авиации [10, 11, 21]. На рис. 6 изображен самолет-лаборатория АН-30Д, предназначенный для съемок МПЗ.



Рис. 6. Летающая лаборатория на базе АН-30Д для съемки параметров МПЗ с установленными датчиками магнитометров в немагнитном стингере в хвосте самолета

Кроме того, в целях обеспечения решения задачи навигации по АМПЗ, как правило, разрабатываются вспомогательные программы [10, 11] для:

- запроса данных из баз АМПЗ и визуализации результатов;
- записи данных АМПЗ;
- пересчета АМПЗ по высотам (глубинам);
- входного контроля картографической информации с визуализацией АМПЗ.

Под геофизическим обеспечением МНС понимается разработка процедур формирования карт, баз данных и алгоритмов вычисления АМПЗ в целях дальнейшего их использования для навигации.

Особенностью наполняемости баз геофизических данных является то, что за период выполнения магнитометрических съемок, охватывающий несколько десятилетий, главное МПЗ изменяется, и, соответственно, необходимы периодическое обновление и верификация баз данных АМПЗ с периодом не более 5 лет.

Проведенный анализ степени изученности территории России по данным картографирования в части АМПЗ показал следующее:

- карты АМПЗ территории страны и прилегающих акваторий в основном были составлены до введения систем спутниковой навигации в аэрогеофизическую практику в 90-х годах XX века;
- для 80-90% существующей картографической продукции отсутствует исходный материал в цифровом формате [10, 11];
- определение АМПЗ на территории страны с использованием современной магнитоизмерительной аппаратуры и спутниковой навигации относительно нормального магнитного поля выполнено фрагментарно;
- только порядка 10-20% карт составлено в цифровом формате, поэтому только эта часть может быть использована для МНС [10, 11].

Современное картографирование больших площадей (построение карт АМПЗ) проводится в основном с помощью аэромагнитных съемок с применением квантовых магнитометров, которые определяют модуль магнитной индукции (в нТл) на высоте съемки. Одновременно с помощью навигационных систем, установленных на носителе, определяются высота и координаты маршрута полета. После полевой и камеральной обработки строятся карты АМПЗ по высоте съемки с цифровыми массивами данных (широта, долгота, значение модуля АМПЗ ΔT_a).

Для создания баз цифровых данных в КЭНС проработаны алгоритмы верификации данных, пересчета модуля магнитной индукции по высоте.

Летные испытания магнитометрической навигационной системы

В целях проверки разработанных алгоритмов пересчета по высоте проведена их экспериментальная апробация на самолетах-лабораториях. В дальнейшем аналогичные эксперименты планируется осуществить на беспилотных летательных аппаратах и морских платформах. Успешно проведены летные испытания экспериментального образца МНС на различных высотах на летающей лаборатории АН-30Д (рис. 6), оборудованной в том числе феррозондовым и квантовым магнитометрами и инерциально-спутниковой навигационной системой. Для геофизического обеспечения испытаний были использованы цифровые карты района проведения работ на высоте 450 м, содержащие участки АМПЗ различной информативности (рис. 7).

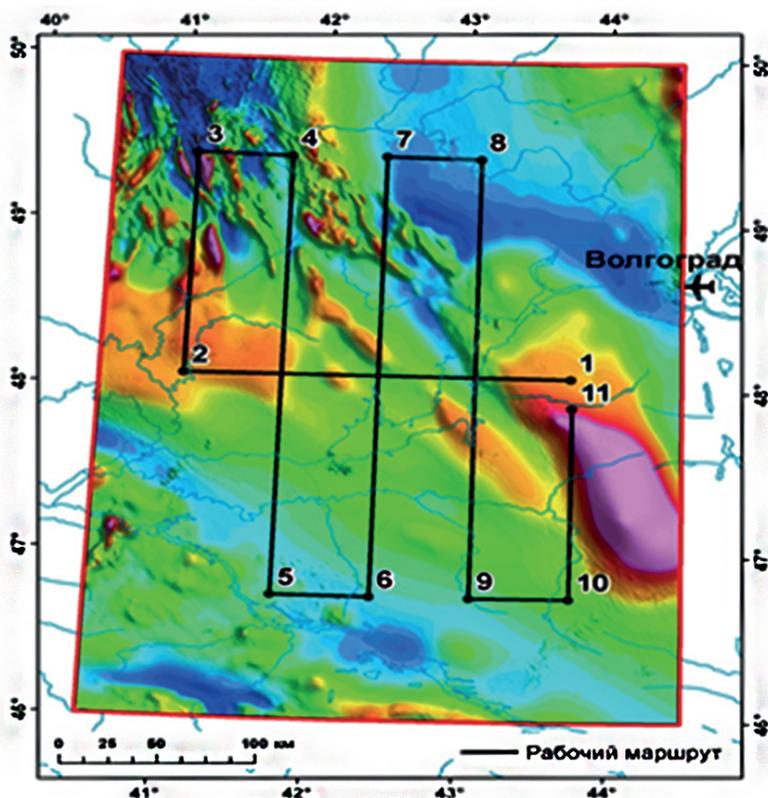


Рис. 7. Карта АМПЗ и маршрут пролета в районе испытаний МНС

Задачами летных испытаний МНС на летающей лаборатории являлись:

- оценка точности карт АМПЗ района испытаний по результатам обработки данных квантового магнитометра;
- оценка точностных характеристик режима корреляционно-экстремальной коррекции.

Летные испытания проводились в два этапа:

- подготовительный (организационный) этап: перелет лаборатории на место испытаний, пробный вылет для проверки работы всех приборов в реальных условиях эксплуатации и установка магнитной вариационной станции;
- основной этап: специальный калибровочный вылет для построения модели компенсации девиации, обработка данных калибровочного вылета, испытательные полеты вдоль заданного маршрута на различных эшелонах (рис. 7).

В ходе летных испытаний подтверждена работоспособность экспериментального образца МНС. Во всех полетах в результате корреляционно-экстремальной обработки текущих и эталонных данных АМПЗ были получены достоверные оценки поправок к координатам.

Летные исследования экспериментального образца МНС позволили обосновать структуру и состав КЭНС по АМПЗ для ЛА, уточнить области ее применения и оценить ожидаемые точностные характеристики.

Более сложными остаются вопросы навигации подводных аппаратов с использованием геофизических полей: магнитного, гравитационного и рельефа морского

дна – как по отдельности, так и при их комплексировании. Это направление представляет собой объемную и многогранную задачу в силу малоизученности и разнообразности пространственных геофизических полей Мирового океана и требует дальнейшего исследования [22–26].

Заключение

КЭНС по пространственным и поверхностным геофизическим полям являются по существу единственной альтернативой ГНСС. Обладая в большинстве применений сопоставимыми с ГНСС потенциальными возможностями в отношении универсальности, способности к интеграции с другими системами, невысокой стоимости аппаратуры пользователей, КЭНС с использованием геофизических полей превосходят ГНСС прежде всего по надежности и автономности.

Для геофизического обеспечения разработки КЭНС с использованием МНС необходимы:

- создание цифровых баз данных АМПЗ с проведением их верификации и валидации;
- разработка программного обеспечения по входному контролю, визуализации характеристик АМПЗ;
- проведение комплексной геофизической (гравитационной, магнитной) съемки для отдельных участков, включая высокоточную аэромагнитную компонентную съемку с помощью специализированной геофизической авиации;
- создание геофизических полигонов с различными участками АМПЗ и современным высокоточным картографированием для проведения исследований работоспособности МНС в КЭНС;
- исследование КЭНС по АМПЗ при полетах над акваториями в высоких широтах и на больших высотах;
- разработка технологий для программного и цифрового картографического обеспечения МНС АНПА;
- исследование КЭНС АНПА по АМПЗ на различных глубинах совместно с параметрами гравитационного поля и рельефа морского дна.

Область применения результатов приведенных исследований достаточно широка. Это прежде всего создание и управление базами данных для МНС (геофизическое обеспечение автономных навигационных систем), централизация и использование цифровой картографической продукции для геологоразведочных работ, а также различные исследования в области наук о Земле.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Grewal, M.S., Andrews, A.P., Bartone, C.**, Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration; Third edition., John Wiley & Sons: Hoboken, 2013. ISBN 978-1-118-44700-0.
2. **Groves, P.D.**, Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems; GNSS technology and application series, 2nd ed., Artech House: Boston, 2013. ISBN 978-1-60807-005-3.
3. **Кошаев Д.А.** Проблемы избытка и недостатка измерений ГНСС в специальных задачах вторичной обработки // Гироскопия и навигация. 2015. № 2 (89). С. 67–91.
4. **Емельянцеv Г.И., Степанов А.П., Блажнов Б.А.** О решении навигационной задачи для летательных аппаратов с использованием инерциального модуля на микромеханических датчиках и наземных радиоориентиров // Гироскопия и навигация. 2017. Том 25. № 1 (96). С. 3–17.

5. Шмидт Дж.Т. Эксплуатация навигационных систем на основе GPS в сложных условиях окружающей среды // Гироскопия и навигация. 2019. Том 27. № 1 (104). С. 3–21.
6. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1979. 448 с.
7. Бочкарев А.М. Корреляционно-экстремальные системы навигации (обзор) // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 9.
8. Степанов О.А. Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. 85 с.
9. Киселёв С.К. Корреляционно-экстремальная навигация по полю магнитных аномалий протяженных ориентиров // Известия РАН. Теория и системы управления. 1997. №6. С. 56.
10. Минлигареев В.Т., Алексеева А.В., Качановский Ю.М. и др. Картографическое обеспечение альтернативной навигации по геофизическим полям Земли // Авиакосмическое приборостроение. 2018. № 11. С. 18–22. DOI: 10.25791/aviakosmos.11.2018.258.
11. 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.
12. Goldenberg, F., Geomagnetic Navigation beyond the Magnetic Compass, Proceedings of IEEE/ION PLANS, 2006, pp. 684–694.
13. Canciani, A.J., Raquet, J.F., Absolute Positioning Using the Earth's Magnetic Anomaly Field, Proceedings of the Institute of Navigation 2015 International Technical Meeting, 2015, pp. 265–278.
14. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Часть 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. № 3 (90). С. 102–125.
15. Сазонова Т.В., Шелагурова М.С. Геоинформация в комплексах бортового оборудования летательных аппаратов. Москва, 2018. С. 80–97.
16. Fournier et al., A candidate secular variation model for IGRF-12 based on data and inverse geodynamo modeling, Earth, Planets and Space, 2015.
17. Cain, J.C., Hendricks, S.J., Langel, R.A., Hudson, W.V.A., Proposed Model for International Geomagnetic Reference Field. 1965, J. Geomagn. and Geoelectr., 1967, vol.19, no. 4, pp. 335–355.
18. Calculation of the magnetic field: NOAA site [Electronic resource]. 2016. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/?model=igrf#igrfwmm> (access date: 14.08.2020).
19. Changing the IGRF model: NOAA website [Electronic resource]. <https://www.ncei.noaa.gov/news/world-magnetic-model-out-cycle-release> (contact date: 14.08.2020).
20. Осипов О.Д., Минлигареев В.Т., Копытенко Ю.А. и др. Исследование дрейфа Южного магнитного полюса Земли и магнитного поля Мирового океана в кругосветной экспедиции ОИС ВМФ «Адмирал Владимирский» // Русское географическое общество. Сайт.08.06.2020. <https://www.rgo.ru/ru/article/chto-novogo-uznali-uchyonye-o-dreyfe-magnitnogo-polyusa-zemli-i-magnitnogo-polyamirovogo> (дата обращения: 14.08.2020).
21. Цирель В.С. Аэромагнитометрия – от А.А. Логачева до наших дней // Геофизика. 1999. №2. С. 4–6.
22. Джанджгава Г.И., Сазонова Т.В. Математическое моделирование алгоритмов определения координат необитаемого подводного аппарата с использованием информации о физических полях Земли // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 1 (174). С. 102–110.
23. Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Медведев А.В. и др. О гравиметрии с борта автономного подводного робота и оценках ее информативности для навигации по карте // Подводные исследования и робототехника. 2019. №1 (27). С. 21–30.
24. Pavlis, N.K., Holmes, S.A., Kenyon, S.C., Factor, J.K., The Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), Journal of Geophysical research, 2012, vol. 117, b04406. DOI: 10.1029/2011jb008916.
25. Barthelmes, F., Definition of the functional relationship of the spirical harmonic models, Polesdam – Deutsches GeoForschungs Zentrum, Scientific Technical Report STR09, 02. 2009. 32 p.
26. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / под общей ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 389 с.

Minligareev, V.T. (E.K. Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow), **Sazonova, T.V.** (Ramenskoye Instrument Design Bureau, JSC), **Arutyunyan, D.A., Tregubov, V.V., and Khotenko, Ye.N.** (E.K. Fedorov Institute of Applied Geophysics)

Geophysical Support of Advanced Autonomous Magnetometric Navigation Systems, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2020, vol. 28, no. 4 (111), pp. 95–105.

Abstract. The paper describes the relevance and advantages of the geophysical support for autonomous magnetometric navigation systems (MNS). Theoretical data on the Earth's magnetic field components are considered, and the displacement of magnetic poles in international models of the Earth's main magnetic field is analyzed. The prospects for mapping and software support of MNS are discussed. The results obtained in the flight studies of the experimental MNS are used in the development and control of MNS databases, centralization and application of digital mapping products for geological exploration, as well as in the course of various studies concerned with earth sciences.

Key words: magnetometric navigation systems, geophysical support, Earth's anomalous magnetic field (EAMF), EAMF maps, databases, correlation-extreme navigation systems (CENS).

Материал поступил 11.08.2020