

### III. Развитие систем навигации

УДК 621.317.4

## ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ И СОСТОЯНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ РАЗРАБОТОК СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ

Л.И. Августов, Г.И. Герасимов, Г.И. Джанджгава

*АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»,  
Раменское Московской области,  
rpkb@rpkb.ru*

*В статье представлены этапы освоения систем автономной глобальной навигации ЛА с использованием данных о естественных геопоях. Показаны основные проблемы, которые были решены при освоении поверхностных полей и которые предстоит решить при освоении пространственных геопоях. Коротко изложены основные результаты выполненных НИР. Дана оценка степени готовности систем автономной глобальной навигации по геопоям к выполнению ОКР.*

*Ключевые слова: автономная глобальная навигация, геопоя, результаты.*

## STAGES OF DEVELOPMENT AND STATE OF DOMESTIC DEVELOPMENT OF GLOBAL AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEMS

L.I. Avgustov, G.I. Gerasimov, G.I. Djandjgava

*Joint Stock Company «Ramenskoye Design Company»,  
Ramenskoe, Moscow region,  
rpkb@rpkb.ru*

*The article presents the stages of development of autonomous global navigation systems for aircraft using data on natural geopotential. The main problems that were solved during the development of surface fields and which are to be solved during the development of spatial geopotential are shown. The main results of the performed research works are briefly stated. An assessment of the degree of readiness of autonomous global navigation systems in geopotential for the implementation of R&D work is given.*

*Key words: autonomous global navigation, geopotential, results.*

### Этап 1. Разработка теории. Проверка идеи (1965 – 1972 гг.)

Начало работ по созданию систем автономной навигации с использованием информации о геофизических полях положила статья д.т.н. А.А.Красовского, начальника 37-ой кафедры в ВВИА им. Жуковского, под названием «Экстремально-инерциальная навигационная система», опубли-

кованная в журнале «Военная радиоэлектроника» в 1963 г. Через два года этой статьей заинтересовались в Раменском приборостроительном конструкторском бюро (РПКБ). Разрабатываемые в КБ инерциальные системы не отвечали необходимым требованиям по точности навигации и корректировались по данным радиотехнических систем типа «Тропик», т.е. были не помехозащищенными.

Для реализации или проверки идеи «ЭИНС» была создана творческая бригада из сотрудников РПКБ и кафедры ВВИА им Н.Е. Жуковского. Задачей РПКБ была разработка промышленного макета (экспериментального образца) рельефометрической ЭИНС на основе теоретических разработок сотрудников ВВИА. На тот момент бортовая техника была аналоговой, и в этом была основная проблема в реализации ЭИНС. Карты местности существовали только в бумажном виде. Поэтому в ЦНИИГАиК была изготовлена карта рельефа местности в районе Венев-Задонск на аэрофото пленке, степень прозрачности которой определяла превышение местности относительно минимальной высоты. Соответственно были изготовлены лентопротяжный механизм и аналоговый коррелятор для вычисления взаимокорреляционного момента между измеренными датчиком и эталонными значениями превышений рельефа местности. В качестве датчика использовались штатные бортовые приборы – баровысотомер и радиодальномер. В качестве ИНС – одна из первых разработок ИНС в РПКБ – гироинерциальная система ГИС «Шар». Экспериментальный образец ЭИНС был поставлен на борт л/л ТУ-104 с последующим проведением летных испытаний. По результатам испытаний был сделан вывод о принципиальной работоспособности рельефометрической ЭИНС. Также были оформлены кандидатские и докторские диссертации, и на этом работа, по всей вероятности, должна была завершиться. И она бы завершилась, если бы не прошла информация о зарубежных разработках подвесных контейнеров с пилотажно-навигационной аппаратурой, использующей информацию о высотах рельефа, радиолокационного и оптического контраста местности для коррекции показаний инерциальной навигационной системы. Наступил второй этап разработки систем автономной навигации по геофизическим полям.

## **Этап 2. Освоение поверхностных полей (1973 – 1990 гг.)**

Становлению этого этапа способствовало появление первых интегрированных микросхем и соответственно первых бортовых ЭВМ. По сравнению с существующими они отличались слабой производительностью, малым объемом памяти и значительными габаритами. В связи с малыми объемами контейнеров, где надо было разместить бортовую систему навигации, были сформулированы соответствующие ТЗ на разработку электронной элементной базы, бортовой ЭВМ, ИНС, баровысотомера, радиовысотомера. В ЭВМ

хранилась картографическая информация, производилось сравнение измеренной и эталонной информации о превышениях рельефа.

Большую проблему как в аппаратном и алгоритмическом планах, так и по трудоемкости представлял перевод аналоговой информации о высотах местности с топокарт в цифру. Этим занялись соответствующие службы геодезии и картографии.

К моменту начала работ по проекту созрела теоретическая база построения цифровой ЭИНС, которая стала называться корреляционно-экстремальной навигационной системой (КЭНС) с точечным зондированием геополей. Вышла книга [1], которая для многих стала настольной. В соответствии с этой книгой были разработаны алгоритм и программа ЭВМ для бортовой системы управления подвешенного контейнера.

Однако навигация по рельефу ограничивала область применения ЛА участками с достаточно пересеченной местностью с условием отсутствия лесной растительности и высотного объектового состава. Поэтому были продолжены исследования по снятию указанных ограничений и в частности по использованию полей оптического, радиолокационного и радиотеплового контраста. Эти поля нестабильны, зависят от погоды и сезона. Но есть объекты на местности, которые сохраняют свой контраст независимо от погодных и сезонных изменений. К таким объектам относятся дороги, русла рек, каналы, границы раздела видов поверхности [2]. Тем более, что их положение достаточно точно отражено на топокартах и располагаются они, как правило, на равнинных участках.

В связи с указанным была инициирована масштабная НИР. В ней участвовали академические и промышленные институты, КБ и предприятия. НИР была направлена на комплексное использование информации о поверхностных и пространственных полях, исследование взаимосвязи геофизических полей, оценку степени их картографированности, разработку алгоритмического и программного обеспечения КЭНС, на создание бортовых датчиков.

Работа носила в основном экспериментальный характер. Было задействовано 4 летающие лаборатории:

в ЛИИ: – Л.Л. АН-30 для оценки работоспособности и качества бортовых датчиков поверхностных полей, датчика геомагнитного поля; Л.Л. ИЛ-18 для оценки точности навигации по гравитационному полю по данным бортового гравиметра;

во ВНИИ Океангеологии: – Л.Л. ИЛ-18ТД для съемки магнитного поля Земли на заданных участках;

в СПбФ ИЗМИРАН: – Л.Л. ИЛ-14 для проведения компонентной съемки МПЗ и проверки методов трансформации МПЗ с высоты картографирования на текущую высоту.

На рис. 1 показана Л.Л. АН 30 с размещенными на ней датчиками. В каче-

стве датчика поверхностных полей использовалась новая на тот момент разработка УПКБ «Деталь» – комбинированный пятилучевой радиоизмеритель (КМРИ). Каждый луч позволял контролировать три параметра – дальность до подстилающей поверхности, радиолокационный и радиотепловой контраст. В качестве бортового датчика МПЗ использовался магнитометр разработки РПКБ – трехкомпонентный феррозондовый для измерения модуля вектора магнитной индукции. Магнитометр располагался в законцовке крыла, как наиболее удаленном месте от источников бортовых помех. Техника на тот момент была в основном аналоговая. Сигналы с датчиков записывались на шлейфовом осциллографе. СНС отсутствовала, так что координаты местоположения определялись с помощью АФА. Оценка местоположения по результатам обработки измеренной и эталонной картографической информации производилась на земле и сравнивалась с данными АФА.

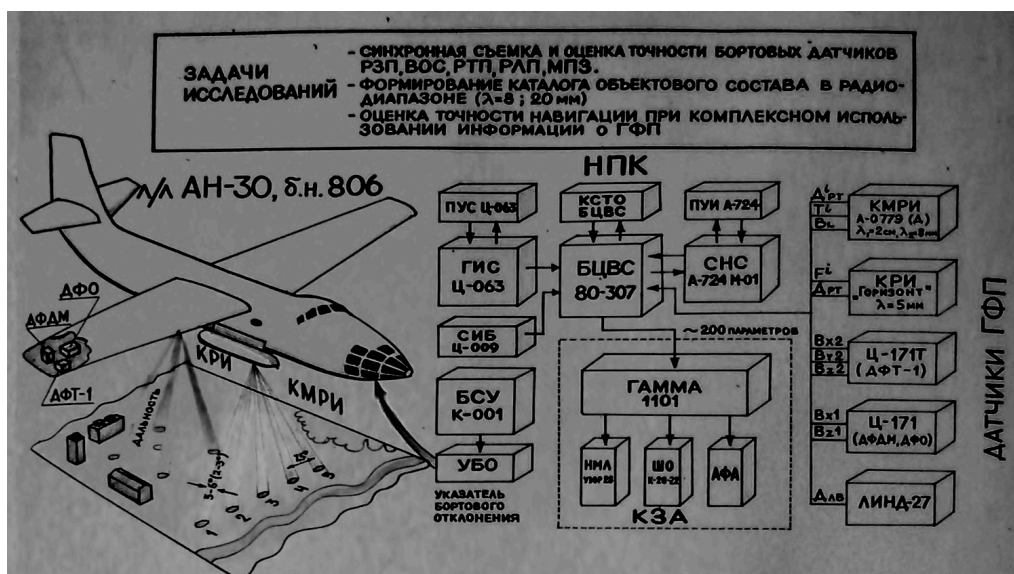


Рис. 1

На рис. 2 представлены показания одного из лучей КМРИ в дальномерном (А-077), радиотепловом (А-077Т) и радиолокационном (А-077В) каналах при движении по указанной сверху траектории. Там же присутствует сигнал с лазерного измерителя дальности (ЛИНД). Информативность указанных полей приведена в таблице 1. Позиционная точность навигации по каждому из этих полей по отдельности и с комплексной обработкой информации по всем полям приведена в таблице 2. Если при оценке местоположения по одному полю погрешность находится в диапазоне 125 – 230 метров ( $m + \sigma$ ), то при комплексной обработке погрешность составляет не более 25 м.

**Этап 3. Освоение пространственных полей (1990 – 2018 гг.)**

Пространственные поля описываются векторными величинами. Если исходить из состава используемых для навигации параметров полей, можно указать следующие разновидности систем автономной навигации по пространственным полям:

- МагКЭНС-1, использующей для работы 1-ую производную магнитного потенциала – модуль вектора напряженности;
- МагКЭНС-2, использующей для работы компоненты вектора напряженности;
- ГравиКЭНС-1, использующей модуль вектора ускорения силы тяжести;
- ГравиКЭНС-2, использующей тензор градиентов силы тяжести.

Наряду с поверхностными исследовались возможности навигации по аномалиям магнитного поля Земли, точнее по аномалиям модуля магнитной индукции. На Л.Л ИЛ-18ТД ВНИИ «Океангеология» (г. С-Петербург) было картографировано 5 участков размером около 200·40 км – три на суше и два на море (Карском и Черном) с использованием впервые СНС. Полученные данные далее были использованы при имитационном моделировании КЭНС.

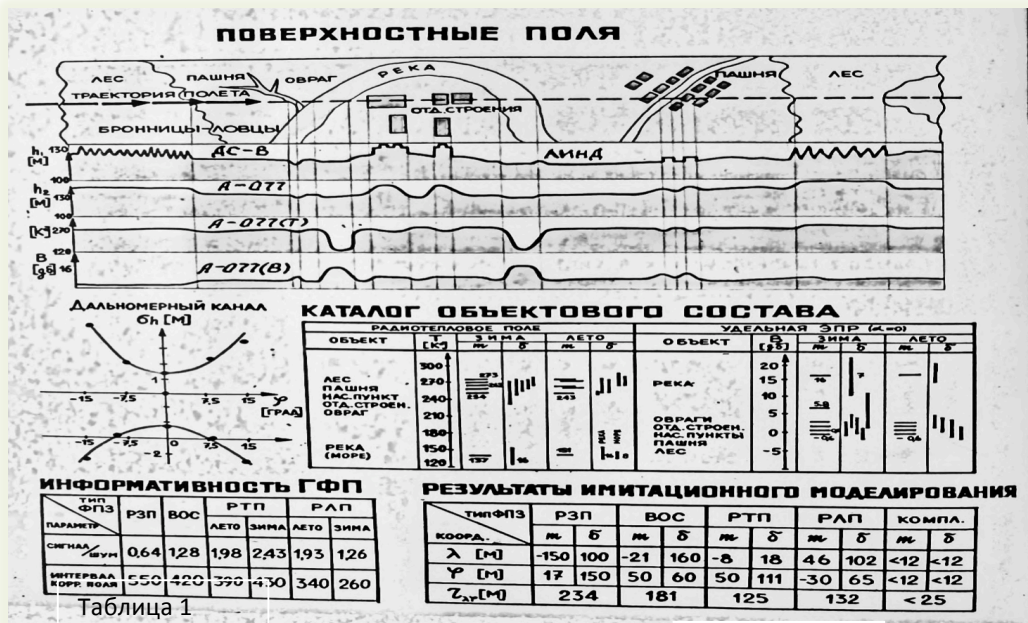


Таблица 1

Таблица 2

Рис. 2

На рис. 3 представлены статистические характеристики аномалий геомагнитного поля на картографированных участках. Указаны также характерный

вид сигналов с датчика, эталонного значения поля и поведения ЛА по крену. Между ними есть определенная взаимосвязь. В ходе имитационного моделирования МагКЭНС-1 с применением данных бортового магнитометра получена точность на уровне 200-600 м ( $\sigma$ ) в зависимости от длины интервала наблюдения и навигационной информативности МПЗ на участках.

ГравиКЭНС-1 была создана специалистами МИЭА. В полете фиксировались показания гравиметра на основе кремниевого акселерометра, показания СНС, ИНС и других вспомогательных приборов. Далее в ходе комплексной постобработки показаний всех приборов определяли аномалии силы тяжести и сравнивали их с эталонами. В результате обработки выяснено: погрешность гравиметра не превышает 2 мГал, а погрешность оценки координат местоположения в полете составила около 600 м ( $\sigma$ ).



Рис. 3

Значительный вклад в развитие автономной навигации по пространственным полям [3] внесён сотрудниками ВВИА им. Н.Е. Жуковского под руководством члена-корреспондента (на тот момент) АН СССР Красовского А.А.

В ходе работ были разработаны и изготовлены:

- три экспериментальных образца бортового гравивариометра (РГВ) модуляционного типа на гантелях с чувствительностью на уровне 15-17 Этвеш (рис. 4); прибор разработан и изготовлен в Опытном производстве РПКБ под руководством с.н.с. ВВИА им. Н.Е.Жуковского А.И. СОРОКА. Для калибровки РГВ была изготовлена соответствующая метрологическая установка (рис 5), гравипортрет которой в образе первой производной гравипотенциала был зарегистрирован с помощью микрогального гравиметра из ИФЗ РАН.



Рис. 4

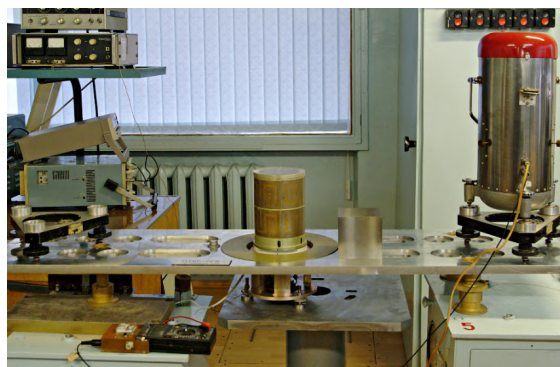


Рис. 5

Были также разработаны и изготовлены:

- экспериментальный образец векторного магнитометра с использованием в качестве указателя горизонта двух инклинометров (рис. 6);
- макет корректирующего гравимагнитного канала (КГМК, рис. 7) для регистрации гравимагнитных «портретов» наземных и подземных массивных объектов, а также проведения полунатурного имитационного моделирования.

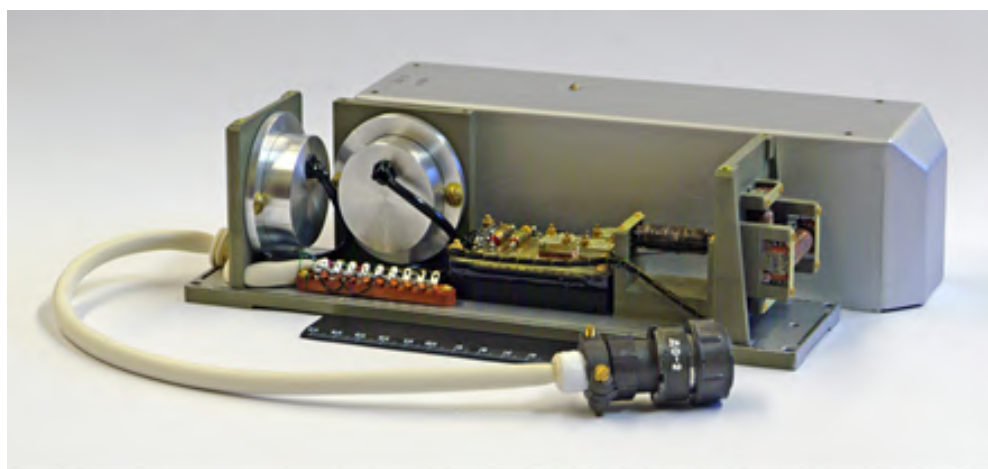


Рис. 6



Рис. 7

Разработаны:

- упрощенные методы пересчета первой и второй производных гравипотенциала на текущую высоту полета, а также пересчета компонент вектора магнитной индукции МПЗ с высоты картографирования на текущую высоту;
- метод синтеза аномалий ГПЗ по превышениям местности и решения обратной задачи;
- предложения по составу и структуре баз данных о МПЗ и ГПЗ.

Проведено исследование по оценке влияния магнитных бурь и суточных вариаций на работоспособность магнитометрической КЭНС.

В ходе работ был создан (изготовлен) автомобильный измерительно-регистрирующий комплекс для изучения тонкой структуры ГПЗ и МПЗ на автодорогах и взлетно-посадочных полосах (грунтовых и бетонных). После обработки полученных данных был сделан вывод о возможности аэродромной навигации и выполнения режимов взлета - посадки по аномалиям магнитного поля. Среднеквадратическое значение аномалий на уровне земли достигало сотен нанотеслов.

А.А. Красовским была теоретически обоснована идея пассивной макроволновой радиолокации (ПМРЛ) (рис. 8). Связано это с тем, что все подвижные объекты в атмосфере начинают «светиться» в связи с их электризацией в определенном диапазоне волн, связанных с габаритами конкретного ЛА и высотой полета.

На основе данного явления были предложены резервная система управления воздушным движением, а также способ навигации по электромагнитному ландшафту местности. Для исследования этого явления на кафедре ВВИА им Н.Е. Жуковского был разработан макет датчика-анализатора спектральных характеристик (ДАСХ) электромагнитных излучений подвижных и неподвижных объектов и проведен успешный ангарный эксперимент с самолетом Су-27 ИБ. На этом работы по реализации ПМРЛ прекратились. Надо



было кооперироваться с радистами. Не получилось в силу финансовых проблем в то время.

Существенная подвижка в плане освоения пространственных полей произошла в период 2015-2018 гг. В этот период были выполнены работы по созданию систем автономной навигации для ЛА с длительным полетом над морской поверхностью и подводного робота большой дальности. В ходе этих работ были рассмотрены вопросы картографической изученности магнитного и гравитационного полей Земли, готовности бортовых датчиков этих полей. К работе были привлечены специалисты СПб филиала ИЗМИРАН и Института физики Земли РАН.

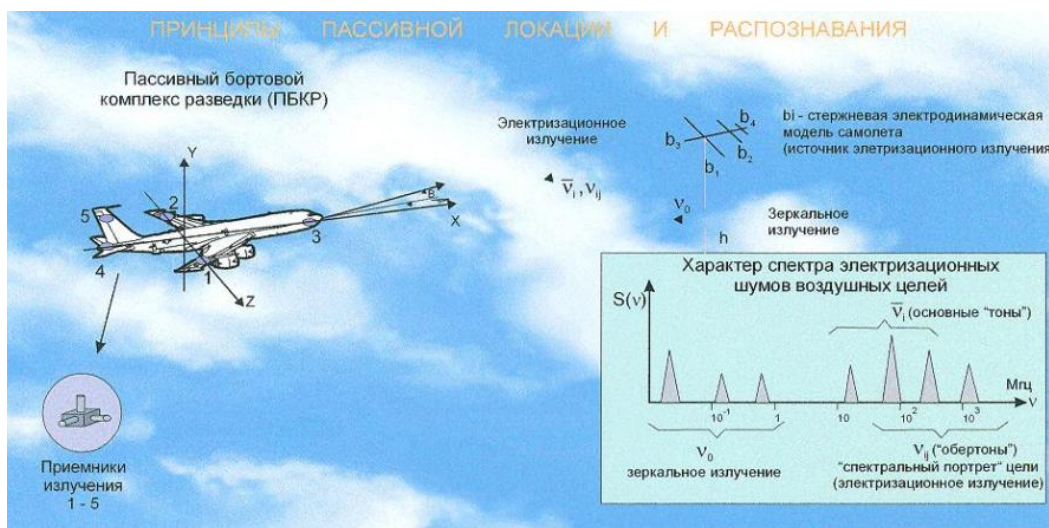


Рис. 8

На текущий момент существует картографическая база аномалий МПЗ практически на весь земной шар (за исключением Антарктиды), полученных в СПбФ ИЗМИРАН по данным измеренных и вычисленных значений компонент вектора МПЗ [4-7]. База регулярно обновляется по мере поступления новых данных.

В части ГПЗ благодаря развитию космической геодезии и улучшению гравиметрической изученности земного шара за рубежом создан ряд новых моделей данного класса, отличающихся повышенной точностью и пространственным разрешением: EGM2008 ( $N = 2190$ ), EIGEN-6C ( $N = 1420$ ), EIGEN-6C2 ( $N = 1949$ ), EIGEN-6C3 ( $N = 1949$ ), EIGEN-6C4 ( $N = 2190$ ), GECO-2014 ( $N = 2190$ ), где  $N$  – предельная степень учитываемых сферических гармоник геопотенциала. Мировой опыт показывает, что на сегодняш-

ний день наиболее широкое международное признание получила модель EGM-2008 Национального управления геопространственной разведки США. Это обусловлено ее достаточно высокими точностными характеристиками и официальным статусом – как модели, обеспечивающей поддержку общеземной геоцентрической системы координат WGS-84. С учетом этого модель EGM-2008 на сегодняшний день рассматривается в качестве базового варианта при выборе расчетной модели для оценки навигационной информативности АГПЗ.

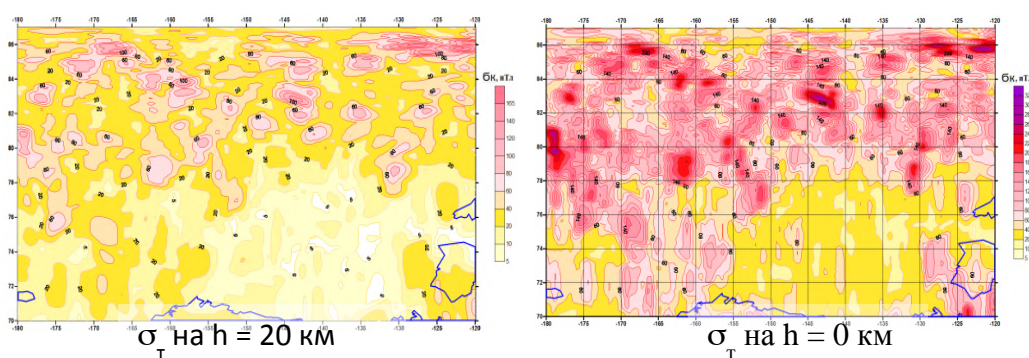
В ходе работ по ПАК ДА на основе указанных моделей магнитного и гравитационного полей Земли:

- дана оценка навигационной информативности ГПЗ и МПЗ (СКО и интервал корреляции) в двух районах Мирового океана; площадь каждого района около 16 млн. кв. км., информативность определялась на высотах: 0; 5; 10; 15; 20 км (рис. 9, 10);

- выявлены закономерности в изменении дисперсии и интервала корреляции аномалий МПЗ и ГПЗ с ростом высоты;

- показана эффективность комплексного использования МПЗ и ГПЗ.

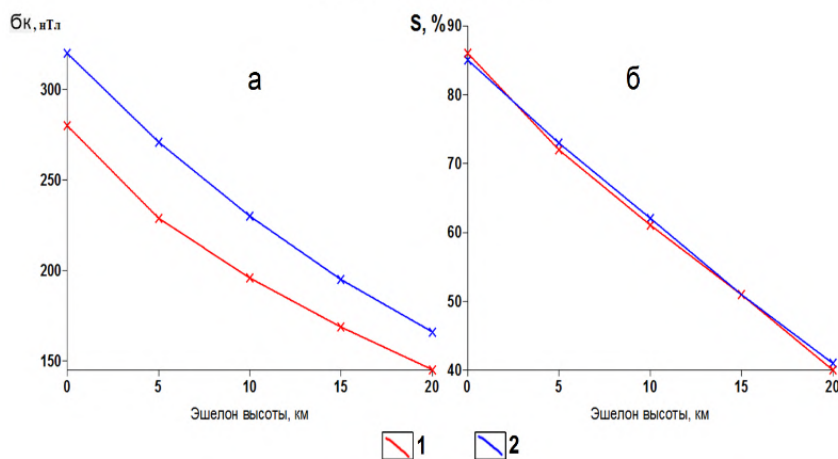
Оценка навигационной информативности определялась на отрезках длиной 100 км в меридиональных и широтных направлениях со скольжением 10 км. На рис 9 представлены результаты оценки информативности СКО на высотах 0 и 20 км для МПЗ (модуль вектора магнитной индукции) и для ГПЗ (градиенты УСТ в горизонте) при суммарных ошибках картографирования и бортовых измерений на уровне 20-25 нТл для МПЗ и 5 Этвеш для ГПЗ. Если на нулевой высоте СКО колеблется от 5 до 325 нТл для МПЗ и от 1 до 22 Этвеш для ГПЗ, то на высоте 20 км от 5 до 155 нТл для МПЗ и от 1 до 5,5 Этвеш для ГПЗ.



$\sigma_T$  на  $h = 20$  км

$\sigma_T$  на  $h = 0$  км

Северный Ледовитый океан



Зависимость СКО аномалий модуля Т от высоты:

**а** – максимальные значения  $B_k$  на разных высотных эшелонах;

**б** – изменение с высотой размеров площади со значениями  $B_k$ , превышающими погрешность нТл картографирования МПЗ по величине (20).

1 – маршруты широтного направления; 2 – маршруты меридионального направления по величине (20 нТл).

1 – маршруты широтного направления; 2 – маршруты меридионального направления

Рис. 9.

Площадь района, пригодная для навигации, составляет:

- для МПЗ на нулевой высоте – около 90 %; на высоте 20 км – 40 %;

- для ГПЗ на нулевой высоте – около 50 %; на высоте 20 км - близко к нулю.

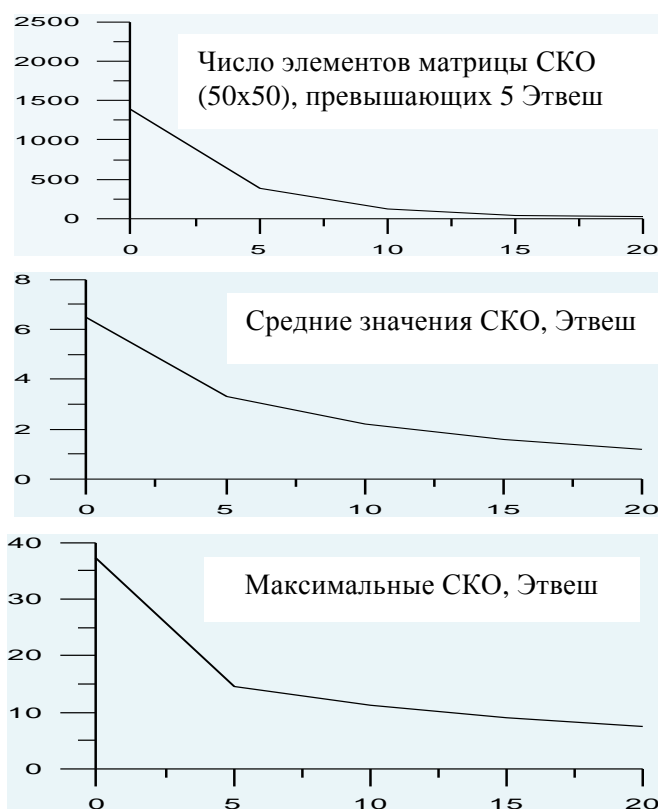
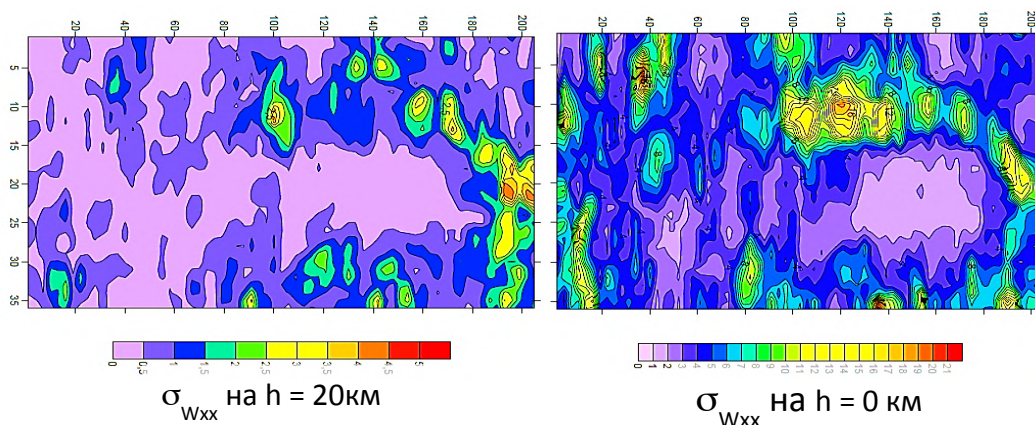


Рис. 10

Из данного факта можно сделать следующие выводы:

- магнитные аномалии более интенсивны и меньше зависят от высоты по сравнению с гравияномалиями;

- для расширения области применения аномального ГПЗ необходимо повышать точность бортовых измерений и точность его картографирования.

На рис. 11 представлена конструкция бортового гравивариометра БГВ-001, разработанного и изготовленного в АО «ИТТ». Чувствительным элементом в нем является акселерометр. Для обеспечения точности измерений не хуже 5 Этвеш надо обеспечить его чувствительность на уровне  $10^{-9}$  g. Пока что достигнута чувствительность на уровне  $10^{-8}$  g.

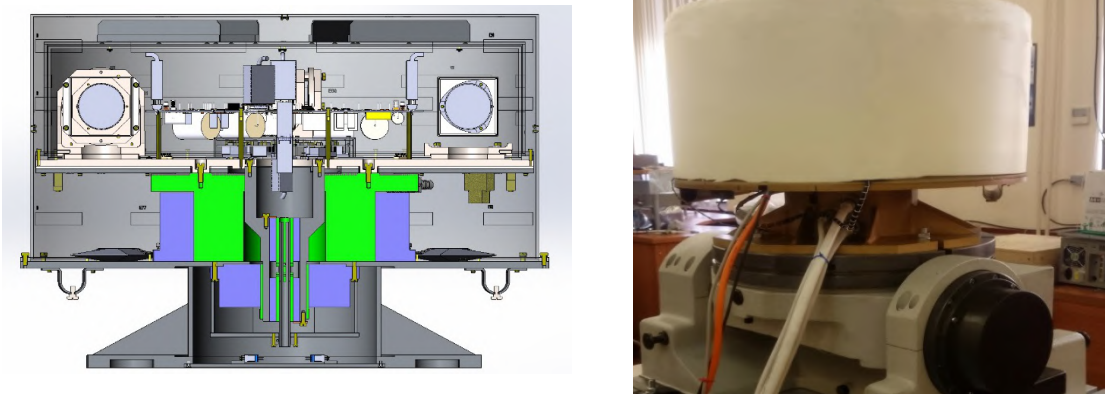


Рис 11

Следующей была работа по созданию системы автономной навигации подводного робота, выполненной в 2015-2016 гг. [3]. Навигация должна осуществляться с использованием данных о ГПЗ, МПЗ и рельефе морского дна (РМД).

Соответственно были разработаны предложения по структуре и составу системы глобальной автономной навигации подводного робота на основе комплексного использования МПЗ, ГПЗ, рельефа морского дна (РМД).

В ходе работ дана оценка навигационной информативности и точности навигации на разных траекториях протяженностью до 30 тысяч километров методом имитационного моделирования при погрешности картографирования и бортовых измерений на уровне 10 и 25 нТл ( $\sigma$ ) для МПЗ и 3 и 5 Этвеш для параметров ГПЗ.

Текущее состояние с освоением КЭНС по пространственным полям, точнее их разновидностей, представлено в таблице 3. Готовность к проведению ОКР есть у МагКЭНС-1 и ГравиКЭНС-1. Однако работа по модулю векторов магнитной индукции и силы тяжести существенно ограничивает точность автономной навигации и область применения. Для освоения МагКЭНС-2 и ГравиКЭНС-2 необходимо выполнить работы, указанные в таблице 3.

Таблица 3

Наименование КЭНС	Измеряемые параметры	Наличие датчика	Наличие карт	Проблемы реализации	Готовность к ОКР
<b>Маг-КЭНС 1</b>	<b>Модуль вектора магнитной индукции</b>	да	да	<b>Компенсация бортовых помех</b>	да
Маг-КЭНС-2	Компоненты вектора магнитной индукции	нет	да	Контроль углового положения чувств. элементов магнитометра	нет
<b>ГравиКЭНС-1</b>	<b>Ускорение силы тяжести</b>	да	да	<b>Компенсация вертикальных ускорений объекта</b>	да
ГравиКЭНС-2	Тензор градиентов ускорения силы тяжести	нет	да	Отсутствие меры градиента УСТ, недостаточная точность чувствит. элементов	нет

### Заключение

- Освоенными в основном можно считать КЭНС по поверхностным геополям. С появлением космического картографирования точность автономной навигации и наведения можно повысить с сотен до десятков и единиц метров.
- Для реализации систем глобальной автономной навигации на основе аномалий пространственных полей необходимо:
  - создать меру градиента силы тяжести с точностью не хуже 0,5 Этвеш;
  - создать бортовые гравиградиентометры авиационного и морского применения с погрешностью не более 5 Этвеш;
  - создать базы данных о параметрах магнитного и гравитационного полей Земли на основе существующих банков в СПбФ ИЗМИРАН и ИФЗ РАН;
  - создать бортовой векторный магнитометр;
  - создать метрологическую базу для калибровки гравиградиентометров и векторных магнитометров.

---

**Литература**

1. Красовский А. А., Белоглазов Н. Н., Чигин Г. П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. -М.: Наука, 1979.
2. Белоглазов И. Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям.- М.: Наука. 1985.
3. Джанджгава Г.И., Геоасимов Г.И., Сазонова Т.В., Августов Л.И., Сотников В.И. Система автономной глобальной навигации подводных роботов // Авиакосмическое приборостроение. № 8. 2016.
4. Петрова А.А. Цифровые карты компонент вектора индукции магнитного поля // Сб. трудов ИЗМИРАН. 2015. С. 412-423.
5. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Результаты разработки и применения компонентной модели магнитного поля Земли в интересах магнитной картографии и геофизики. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2016. Т. 9 № 2. С. 88-106.
6. Копытенко Ю.А., Петрова А.А. Компоненты морских линейных магнитных аномалий Мирового океана. Ч. 1. Северная Атлантика // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. №4. С. 34-41. doi: 10.7868/S2073667318040056
7. Колесова В.И. Аналитические методы магнитной картографии. -М.: Наука. 1986. 223 с.
8. N.K. Pavlis, S.A. Holmes, S.C. Kenyon, J.K. Factor. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal of geophysical research. 2012. V. 117. b04406, doi:10.1029/2011jb008916.