

УДК 531.383.11

Г.И. Джанджгава, Т.В. Сазонова

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО  
АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ  
О ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ ЗЕМЛИ**

*Рассматриваются вопросы применения принципов корреляционно-экстремальной коррекции навигационных параметров с использованием информации о физических полях Земли (ФПЗ) для малоскоростного необитаемого подводного аппарата (НПА). Целью математического моделирования являлась оценка возможности корреляционно-экстремальной обработки (КЭО) и её точностных характеристик с использованием магнитного, гравитационного полей Земли и рельефа морского дна, а также при их комплексировании. При проведении математического моделирования использовалась реальная картографическая информация по всем рассматриваемым ФПЗ. Начальное положение НПА при моделировании задавалось случайным образом с учетом априорной погрешности БИНС от 1000 м до 25000 м. Статистические характеристики КЭО оценивались по серии запусков при различных априорных ошибках БИНС, погрешностях картографирования, ошибках датчиков ФПЗ и ухода скорости НПА. Проведенное математическое моделирование режима КЭО показало, что наиболее целесообразно комплексное использование рассматриваемых ФПЗ. При этом потенциально достижимые точности коррекции методом КЭО оцениваются на уровне 200 м. При невозможности проведения КЭО по рельефу морского дна из-за ограничений по глубине погружения НПА основным для целей коррекции является магнитное поле Земли. В этом случае точность коррекции ухудшается до значений на уровне 450-500 м. КЭО по гравитационному полю имеет точностные характеристик хуже, чем по магнитному полю, примерно в полтора раза и, кроме того, при его использовании резко возрастает вероятность срыва экстремальной коррекции. Поэтому гравитационное поле целесообразно применять только совместно с магнитным полем для обеспечения КЭО в случае возникновения сильных магнитных помех.*

*Корреляционно-экстремальные навигационные системы; физические поля Земли; магнитное поле; гравитационное поле; рельеф морского дна.*

G.I. Dzhandzhgava, T.V. Sazonova

**MATHEMATICAL MODELLING OF COORDINATE DETERMINATION  
ALGORITHMS FOR UNMANNED UNDERWATER VEHICLE USING DATA  
ON EARTH'S PHYSICAL FIELDS**

*Issues concerning employment of principles of correlation-extreme correction of navigation parameters by the use of data on Earth's physical field (EPF) for a low-speed unmanned underwater vehicle (UUV). The purpose of math modelling was estimation of correlation-extreme processing (CEP) capability and its precision characteristics by the use of Earth's magnetic, gravitational fields and seabed relief as well as by combining all these data. Real cartographic information on all studied EPFs was used for math modelling. Initial position of UUV was set randomly considering prior error of strap-down INS from 1000 m to 25000 m. Statistic characteristics of CEP were estimated via series of starts by various prior INS errors, cartographic errors, EPF sensor errors and UUV speed drift. Carried out math modelling of CEP mode showed that it is rational to use studied EPFs in combination. Moreover potentially achievable correction CEP accuracies are estimated at level 200 m. If CEP by seabed relief can not be performed due to limitation on UUV dive depth then Earth's magnetic field is crucial for correction. In this case correction accuracy deteriorates to values at level 450-500 m. CEP by gravitational field has precision characteristics worse than by magnetic heading, approximately by 1.5 and, moreover when it is used the risk of extreme correction failure. That is why it is rational to use gravitational field only with magnetic field in order to carry out CEP if there is strong magnetic interference.*

*Correlation extreme navigation system; Earth's physical fields; magnetic field; gravitational field; seabed relief.*

**Введение.** В середине 70-х гг. активно развивались методы коррекции навигационных параметров движущихся объектов по информации о физических полях Земли (ФПЗ), так называемые корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС) [1–5]. Основным преимуществом КЭНС является автономность и не расходящиеся во времени ошибки определения навигационных параметров. Развитие глобальных спутниковых навигационных систем [6] снизил интерес к применению КЭНС, однако в последнее время из-за угрозы несанкционированных воздействий требование автономности работы навигационных систем боевых комплексов вышло на первое место.

КЭНС в основном разрабатывались для летательных аппаратов, при этом исследовалось использование как пространственных (магнитного, гравитационного полей), так и поверхностных (поля рельефа, радиотеплового и радиолокационного) ФПЗ. Промышленно освоены, в том числе и в АО «РПКБ», КЭНС по рельефу земной поверхности. Следует отметить, что методы экстремальной коррекции для летательных аппаратов в АО «РПКБ» постоянно совершенствуются, что подтверждается патентами на изобретения [7] и новыми публикациями [8].

Применение методов экстремальной коррекции для НПА потребовало дополнительных исследований, связанных с адаптацией алгоритмов корреляционно-экстремальной обработки (КЭО) для малоскоростных движущихся объектов, а также с комплексным использованием ФПЗ.

**Цели математического моделирования.** В данной статье представлены результаты математического моделирования алгоритмов КЭО, целью которого являлись:

1. Оценка возможности коррекции навигационных координат НПА при использовании карт:

- ◆ магнитного поля Земли (МПЗ) [9–14];
  - ◆ гравитационного поля Земли (ГПЗ) [15–22];
  - ◆ рельефа морского дна (РМД);
  - ◆ комплексном использовании МПЗ, ГПЗ и РМД.
2. Оценка точностных характеристик КЭНС по ФПЗ для НПА.
3. Формирование рекомендаций и ограничений по использованию ФПЗ для коррекции навигационных координат НПА.

3. Формирование рекомендаций и ограничений по использованию ФПЗ для коррекции навигационных координат НПА.

**Исходные данные для математического моделирования:**

По НПА:

- ◆ скорость  $V_n=26$  км/ч;
- ◆ тип траектории на участке коррекции – *прямолинейная ортодромия*.

По датчику и карте МПЗ: суммарная погрешность ( $\sigma$ ): 15 нТл, 25 нТл, 50 нТл.

По датчику и карте ГПЗ: суммарная погрешность ( $\sigma$ ): 5 ЭТВеш, 15 ЭТВеш, 25

ЭТВеш.

По датчику и карте РМД: суммарная погрешность ( $\sigma$ ): 10 м, 25 м, 50 м

Погрешность картографирования в плане ( $\sigma$ ): 250 м.

По БИНС:

- ◆ априорная погрешность: 1000 м, 5000 м, 10000 м, 25000 м;
- ◆ погрешности измерения скорости  $\sigma V=0.1, 0.2$  м/с, угла курса  $0.12^\circ$

**Адаптация алгоритмов КЭО для НПА.** В ходе исследований была проведена адаптация алгоритмов КЭО для НПА, заключающаяся в следующем:

1. Из-за низких скоростей НПА размер доверительного квадрата учитывает помимо априорных погрешностей определения координат также ошибки по скорости и подводные течения.
2. Все расчеты (задание доверительного квадрата на сфере Земли, дискретов в радианах и т.д.) проводятся в географической системе координат, что обусловлено большой длиной маршрутов НПА.
3. Используется только поисковое оценивание, так как увеличение интервала наблюдения для проведения беспойскового оценивания из-за ошибок по скорости или подводных течений ведет к уменьшению точности определения координат по сравнению с поисковым оцениванием.

#### **Методика математического моделирования алгоритмов КЭО:**

1. Начальное положение НПА при моделировании задавалось случайным образом с учетом априорной погрешности БИНС. Статистические характеристики КЭО оценивались по 20-и запускам на 1-м участке коррекции для исследования точности КЭО в зависимости от априорной ошибки БИНС.
2. Экстремальная коррекция проводилась непрерывно, т.е. после получения достоверной оценки поправок к координатам имитировалось списание ошибок БИНС, и в соответствии с рассчитанной дисперсией ошибок коррекции назначалась новая априорная ошибка БИНС для проведения дальнейшей КЭО.
3. При отсутствии достоверной оценки КЭО в течение 3-х минимальных длин наблюдения назначалась новая априорная ошибка БИНС с учетом ее увеличения за время неудачной коррекции.
4. По результатам моделирования выбиралась максимальная длина автономной работы БИНС вдоль маршрута. Также вдоль всего маршрута фиксировались «промахи» КЭНС.
5. Используется реальная картографическая информация по всем ФПЗ

**Результаты математического моделирования.** Результаты моделирования алгоритмов КЭО по МПЗ, ГПЗ, РМД и при их комплексном использовании приведены на графиках «промахов» (рис. 1–8) для самого лучшего и самого худшего сочетания погрешностей.

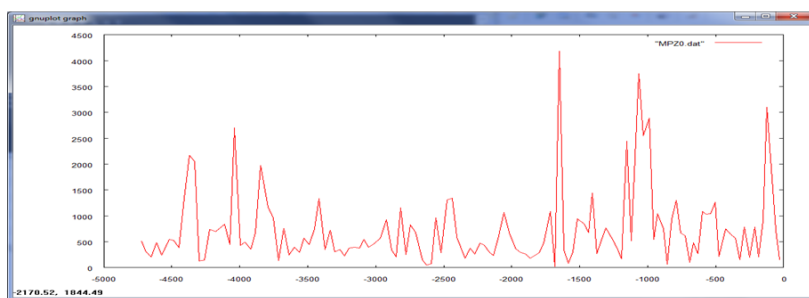


Рис. 1. График «промахов» КЭО по МПЗ при погрешностях БИНС 1000м, магнитометра+ картографирования 15 нТл, измерения скорости 0.1 м/с

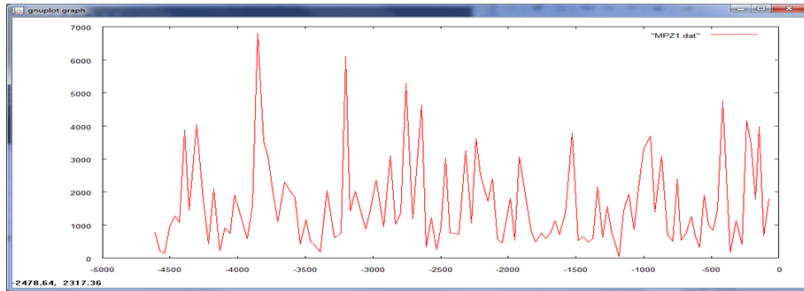


Рис. 2. График «промахов» КЭО по МПЗ при погрешностях БИНС 25000м, магнитометра+ картографирования 50 нТл, измерения скорости 0.2 м/с

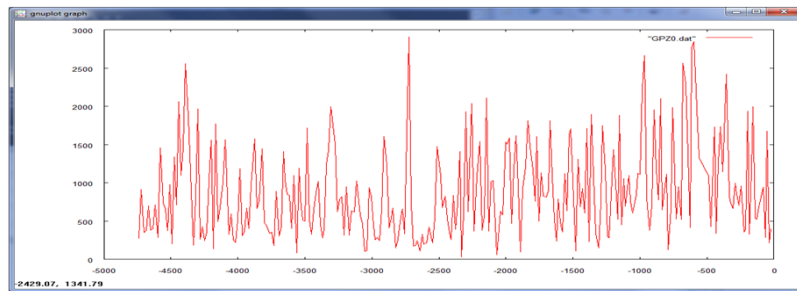


Рис. 3. График «промахов» КЭО по ГПЗ при погрешностях БИНС 1000м, гравариометра+ картографирования 5 Этвеш, измерения скорости 0.1 м/с

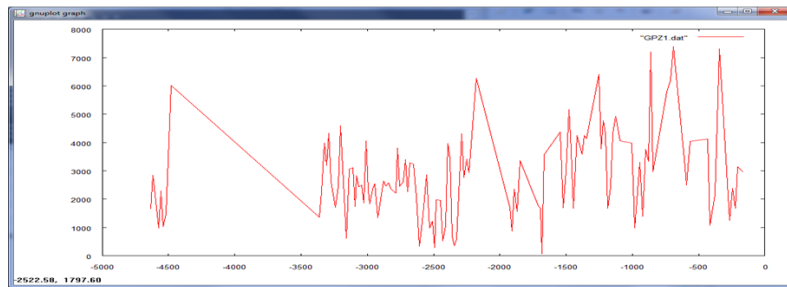


Рис. 4. График «промахов» КЭО по ГПЗ при погрешностях БИНС 25000м, гравариометра+ картографирования 25 Этвеш, измерения скорости 0.2 м/с

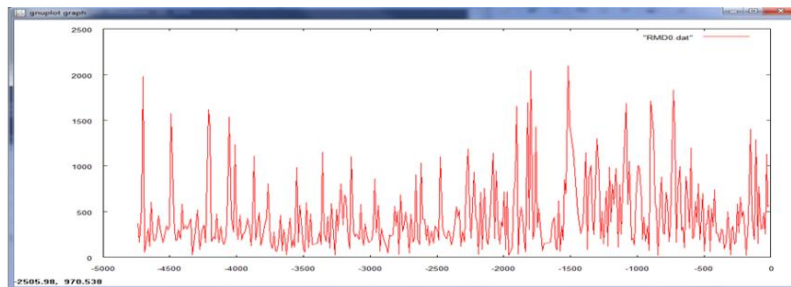


Рис. 5. График «промахов» КЭО по РМД при погрешностях БИНС 1000м, эхолота + картографирования 10 м, измерения скорости 0.1 м/с

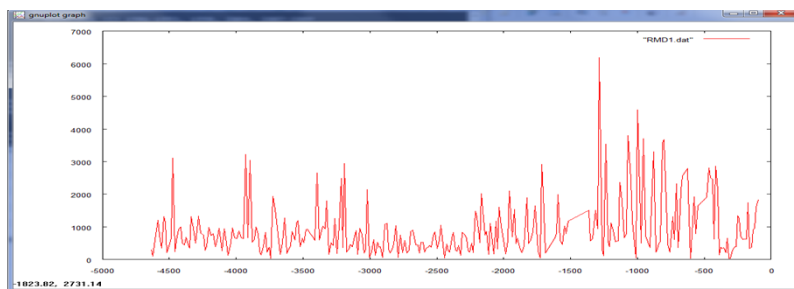


Рис. 6. График «промахов» КЭО по РМД при погрешностях БИНС 25000 м, эхолота + картографирования 50 м, измерения скорости 0.2 м/

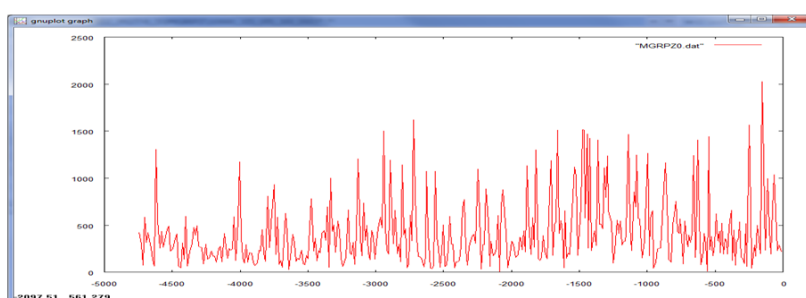


Рис. 7. График «промахов» КЭО при комплексном использовании ФПЗ и погрешностях БИНС 1000 м, суммарных погрешностях МПЗ 15 нТл, ГПЗ 5 Этвеш, РМД 10 м, измерения скорости 0.1 м/с

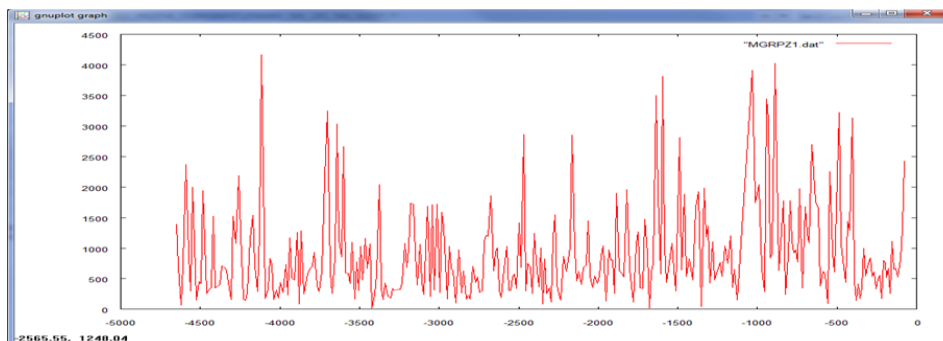


Рис. 8. График «промахов» КЭО при комплексном использовании ФПЗ и погрешностях БИНС 25000 м, суммарных погрешностях МПЗ 50 нТл, ГПЗ 25 Этвеш, РМД 50 м, измерения скорости 0.1 м/с

#### Выводы:

1. Проведенное математическое моделирование КЭО по МПЗ показало, что в зависимости от ошибок БИНС ( $\sigma_{\text{БИНС}}$ ), погрешностей измерения и картографирования МПЗ ( $\sigma_{\text{МПЗ}}$ ) и ошибок по скорости ( $\sigma_v$ ) точность КЭО по МПЗ ( $\sigma_{\text{круг}}$ ) лежит в пределах от 481 м (при  $\sigma_{\text{БИНС}} = 1000$  м,  $\sigma_{\text{МПЗ}} = 15$  нТл,  $\sigma_v = 0,1$  м/с) до 4041 м (при  $\sigma_{\text{БИНС}} = 25000$  м,  $\sigma_{\text{МПЗ}} = 50$  нТл,  $\sigma_v = 0,2$  м/с). Количество срывов КЭО по МПЗ по маршруту по данным моделирования лежит в пределах 0–1. Максимальная длина участка автономной работы БИНС около 242 км, что соответствует при крейсерской скорости 26 км/ч времени 9,3 часа и накопленной ошибке БИНС  $\sigma = 17,3$  км.

Учитывая, что максимальная априорная ошибка БИНС, которую «отрабатывает» КЭО,  $\sigma=25$ км, то при использовании МПЗ обеспечивается непрерывное определение поправок к координатам НПА.

2. Математическое моделирование КЭО по ГПЗ показало, что в зависимости от ошибок БИНС, погрешностей измерения и картографирования ГПЗ ( $\sigma_{ГПЗ}$ ) и ошибок по скорости точность КЭО по ГПЗ ( $\sigma_{круг}$ ) лежит в пределах **от 683м** (при  $\sigma_{БИНС}=1000$ м,  $\sigma_{ГПЗ}=5$  ЭТВЕШ,  $\sigma_v=0,1$  м/с) **до 6924м** (при  $\sigma_{БИНС}=25000$ м,  $\sigma_{ГПЗ}=25$  ЭТВЕШ,  $\sigma_v=0,2$ м/с). По сравнению с КЭО по МПЗ точностные характеристики КЭО по ГПЗ хуже примерно в полтора раза. Кроме того, резко возрастает количество участков коррекции, на которых из-за малоинформативности ГПЗ не была выработана достоверная оценка – от 1-3 при небольших погрешностях до 8–13 при больших погрешностях. Максимальная длина участка автономной работы БИНС существенно зависит от суммарной погрешности гравивариометра и картографирования ГПЗ. Если данная погрешность **не превосходит 5 ЭТВЕШ**, то максимальная длина составляет 148,5 км, что соответствует при крейсерской скорости 26 км/ч времени 5,7 часа и накопленной ошибке БИНС  $\sigma=10,5$ км. При больших погрешностях гравивариометра и картографирования ГПЗ максимальная длина автономной работы БИНС возрастает до величин, при которых не обеспечивается непрерывное определение поправок к координатам НПА.

3. Проведенное математическое моделирование КЭО по РМД показало, что в зависимости от ошибок БИНС, погрешностей измерения и картографирования РМД ( $\sigma_{РМД}$ ) и ошибок по скорости точность КЭО по РМД ( $\sigma_{круг}$ ) лежит в пределах **от 276м** (при  $\sigma_{БИНС}=1000$ м,  $\sigma_{РМД}=10$  м,  $\sigma_v=0,1$  м/с) **до 2453м** (при  $\sigma_{БИНС}=25000$ м,  $\sigma_{РМД}=50$ м,  $\sigma_v=0,2$ м/с). По сравнению с КЭО по потенциальным полям МПЗ и ГПЗ точностные характеристики КЭО по РМД лучше. Количество участков коррекции, на которых из-за малоинформативности РМД не была выработана достоверная оценка лежит в пределах от 1-3 при небольших погрешностях до 3–6 при больших погрешностях. Максимальная длина участка автономной работы БИНС существенно зависит от суммарной погрешности эхолота и картографирования РМД. Если данная погрешность **не превосходит 25м**, то максимальная длина составляет 192,3 км, что соответствует при крейсерской скорости 26 км/ч времени 7,4 часа и накопленной ошибке БИНС  $\sigma=13,7$ км. При больших погрешностях эхолота и картографирования максимальная длина автономной работы БИНС возрастает до величин, при которых не обеспечивается непрерывное определение поправок к координатам НПА.

4. Математическое моделирование КЭО при комплексном использовании МПЗ, ГПЗ и РМД показывает, что по сравнению с КЭО по каждому из ФПЗ точностные характеристики КЭО при их комплексировании лучше и лежат в пределах **от 229м** (при  $\sigma_{БИНС}=1000$ м,  $\sigma_{МПЗ}=15$  нТл,  $\sigma_{ГПЗ}=5$  ЭТВЕШ,  $\sigma_{РМД}=10$  м,  $\sigma_v=0,1$  м/с) **до 2272м** (при  $\sigma_{БИНС}=25000$ м,  $\sigma_{МПЗ}=50$  нТл,  $\sigma_{ГПЗ}=25$  ЭТВЕШ,  $\sigma_{РМД}=50$ м,  $\sigma_v=0,2$ м/с). Количество участков коррекции, на которых из-за малоинформативности ФПЗ не была выработана достоверная оценка, в основном 0 при малых погрешностях и 0-1 при больших погрешностях. Максимальная длина участка автономной работы БИНС составляет 189 км и соответствует накопленной ошибке БИНС  $\sigma=13,5$ км, что меньше максимальной обрабатываемой КЭО априорной ошибки  $\sigma=25$ км. Таким образом, при комплексном использовании ФПЗ обеспечивается непрерывное определение поправок к координатам. Также следует отметить, что при комплексном использовании ФПЗ **уменьшается разброс «промахов»** КЭО.

**Заключение.** Проведенное математическое моделирование режима КЭО по магнитному, гравитационному полям Земли и рельефу морского дна показало, что наиболее целесообразно использовать эти три поля комплексно.

При невозможности проведения КЭО по РМД из-за ограничений по глубине погружения НПА основным для целей коррекции является магнитное поле Земли. Гравитационное поле может использоваться совместно с магнитным полем для обеспечения КЭО в случае возникновения сильных магнитных помех типа магнитных бурь.

Анализ достаточности полученной точности решения навигационной задачи для конкретных практических целей выходит за рамки данной статьи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. – М.: Наука, 1985. – 328 с.
2. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
3. Бочкарев А.М. Корреляционно-экстремальные системы навигации (обзор) // Зарубежная радиоэлектроника. – 1981. – № 9.
4. Джанджгава Г.И., Герасимов Г.И., Августов Л.И. Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 3 (140). – С. 74-84.
5. Алексеев В.И., Кориков А.М., Полонников Р.И., Тарасенко В.П. Экстремальная радионавигация. – М.: Наука, 1978. – 280 с.
6. Глобальная спутниковая радиолокационная система ГЛОНАСС. – 2-е изд. испр. / Под ред. Харисова В.Н., Перова А.И., Болдина В.А. – М.: ИПРЖР, 1999.
7. Патент РФ на изобретение «Комплексная корреляционно-экстремальная навигационная система» №2525601 / Джанджгава Г.И., Сазонова Т.В., Шелагурова М.С., Леуцук О.Г., Симкин Н.В. от 23 июня 2013.
8. Августов Л.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И., Сухоруков С.Я., Шкред В.К. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. – М., 2015. – 592 с.
9. Колесова В.И., Кропачев Э.П., Лысенко Л.С., Привалова Л.А. Мировые магнитные карты эпохи 1970 // Геомагн. и аэрономия. – 1974. – Т. 14, № 4.
10. Луговенко В.Н. Статистический анализ аномального магнитного поля территории СССР. – М.: Наука, 1974. – 201 с.
11. Мирлин Е.Г., Мелихов В.Р., Вержбицкий Е.В. Статистические характеристики аномального магнитного поля центральной части Атлантического океана // Океанология. – 1972. – Т. XIII. – Вып. 3. – С. 437-444.
12. Кругляков А.А., Розе Е.Н., Чесноков Л.В. Статистическая модель аномального магнитного поля акватории Индийского океана // Океанология. – 1976. – Т. XVI. – Вып. 3. – С. 473-478.
13. Шрейдер А.А., Валяшко Г.М., Назаров Е.А. Магнитная неоднородность дна котловин северо-западной части Индийского океана // Океанология. – 1976. – Т. XVI. – Вып. 1. – С. 105-112.
14. Гурьев И.С. Адаптивные магнитометрические системы контроля пространственного положения. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. отделение, 1985. – 96 с.
15. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). – URL: <http://icgem.gfz-potsdam.de>.
16. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008) // Journal of geophysical research. – 2012. – Vol. 117. – b04406, doi: 10.1029/2011jb008916.
17. Левицкая З.Н. Статистические модели аномальных характеристик гравитационного поля Земли // Гравиметрические исследования на море. – 1988. – С. 26-47.
18. Пеллинен Л.П., Нейман Ю.М. Физическая геодезия // Геодезия и аэрофотосъемка. Итоги науки и техники ВИНТИ. – 1980. – Т. 18. – 132 с.
19. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геоэлектроника: теория и практика. Ин-т проблем безопасности развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2010. – 327 с.

20. Серкеров С.А. Корреляционные методы анализа в гравиразведке и магниторазведке. – М.: Недра, 1986. – 247 с.
21. Непоклонов В.Б. Компьютерные модели аномального гравитационного поля Земли // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1998. – № 6. – С. 104-106.
22. Barthelmes F. Definition of functional of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models // Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum – Scientific Technical Report STR09/02. – 2009. – 32 p.

## REFERENCES

1. Beloglazov I.N., Dzhandzhgava G.I., Chigin G.P. Osnovy navigatsii po geofizicheskim polyam [Principles of navigation by geophysical fields]. Moscow: Nauka, 1985, 328 p.
2. Krasovskiy A.A., Beloglazov I.N., Chigin G.P. Teoriya korrelyatsionno-ekstremal'nykh navigatsionnykh system [Theory of correlation-extreme navigation systems]. Moscow: Nauka, 1979, 448 p.
3. Bochkarev A.M. Korrelyatsionno-ekstremal'nye sistemy navigatsii (obzor) [Correlation-extreme navigation systems], *Zarubezhnaya radioelektronika* [Foreign radio electronics], 1981, No. 9.
4. Dzhandzhgava G.I., Gerasimov G.I., Avgustov L.I. Navigatsiya i navedenie po prostranstvennym geofizicheskim polyam [Navigation and guidance by spatial geophysical fields], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 3 (140), pp. 74-84.
5. Alekseev V.I., Korikov A.M., Polonnikov R.I., Tarasenko V.P. Ekstremal'naya radionavigatsiya [Extreme radio navigation]. Moscow: Nauka, 1978, 280 p.
6. Global'naya sputnikovaya radiolokatsionnaya sistema GLONASS [Global satellite radar system GLONASS]. 2nd ed., Ed. by Kharisova V.N., Perova A.I., Boldina V.A. Moscow: IPRZhR, 1999.
7. Dzhandzhgava G.I., Sazonova T.V., Shelagurova M.S., Leshchuk O.G., Simkin N.V. Kompleksnaya korrelyatsionno-ekstremal'naya navigatsionnaya sistema [Integrated correlation-extreme navigation system]. Patent RF on invention No. 2525601 dtd. 23rd June 2013.
8. Avgustov L.I., Babichenko A.V., Orekhov M.I., Sukhorukov S.Ya., Shkred V.K. Navigatsiya letatel'nykh apparatov v okolozemnom prostranstve [Navigation of aircraft in circumterrestrial space]. Moscow, 2015, 592 p.
9. Kolesova V.I., Kropachev E.P., Lysenko L.S., Privalova L.A. Mirovye magnitnye karty epokhi 1970 [Global magnetic charts of age 1970], *Geomagn. i aeronomiya* [Geomagn. and aeronomics], 1974, Vol. 14, No. 4.
10. Lugovenko V.N. Statisticheskiy analiz anomal'nogo magnitnogo polya territorii SSSR [Statistical analysis of anomalous magnetic field of the USSR territory]. Moscow: Nauka, 1974, 201 p.
11. Mirlin E.G., Melikhov V.R., Verzhbitskiy E.V. Statisticheskie kharakteristiki anomal'nogo magnitnogo polya tsentral'noy chasti Atlanticheskogo okeana [Statistical characteristics of anomalous magnetic field of the central part of the Atlantic Ocean], *Okeanologiya* [Oceanology], 1972, Vol. XIII, Issue 3, pp. 437-444.
12. Kruglyakov A.A., Roze E.N., Chesnokov L.V. Statisticheskaya model' anomal'nogo magnitnogo polya akvatorii Indiyского okeana [Statistical model of anomalous magnetic field of the Indian Ocean waters], *Okeanologiya* [Oceanology], 1976, Vol. XVI, Issue 3, pp. 473-478.
13. Shreyder A.A., Valyashko G.M., Nazarov E.A. Magnitnaya neodnorodnost' dna kotlovin severo-zapadnoy chasti Indiyского okeana [Magnetic nonuniformity of seabed of the north-west part of the Indian Ocean], *Okeanologiya* [Oceanology], 1976, Vol. XVI, Issue 1, pp. 105-112.
14. Gur'ev I.S. Adaptivnye magnitometricheskie sistemy kontrolya prostranstvennogo polozheniya [Adaptive magnetometric systems for attitude control]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad. otdelenie, 1985, 96 p.
15. International Centre for Global Earth Models (ICGEM). Available at: <http://icgem.gfz-potsdam.de>.
16. Pavlis N.K., Holmes S.A., Kenyon S.C., Factor J.K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008), *Journal of geophysical research*, 2012, Vol. 117. b04406, doi: 10.1029/2011jb008916.



17. Levitskaya Z.N. Statisticheskie modeli anomal'nykh kharakteristik gravitatsionnogo polya Zemli [Statistical models of anomalous characteristics of Earth's gravitational field], *Gravimetricheskie issledovaniya na more* [Gravimetric studies in the sea], 1988, pp. 26-47.
18. Pellinen L.P., Neyman Yu.M. Fizicheskaya geodeziya [Physical geodesy], *Geodeziya i aerofotos'emka. Itogi nauki i tekhniki VINITI* [Geodesy and aerial photography. Summary of science and technics of ARISTI], 1980, Vol. 18, 132 p.
19. Dem'yanov V.V., Savel'eva E.A. Geostatistika: teoriya i praktika / In-t problem bezopasnosti razvitiya atomnoy energetiki RAN [Geostatistics: theory and practice / RAS Institute of safety problems in nuclear power engineering development]. Moscow: Nauka, 2010, 327 p.
20. Serkerov S.A. Korrelyatsionnye metody analiza v gravirazvedke i magnitorazvedke [Correlation methods of analysis in gravity surveillance and geomagnetic]. Moscow: Nedra, 1986, 247 p.
21. Nepoklonov V.B. Komp'yuternye modeli anomal'nogo gravitatsionnogo polya Zemli [Computer models of anomalous Earth's gravitational field], *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos'emka* [Geodesy and aerial photography], 1998, No. 6, pp. 104-106.
22. Barthelmes F. Definition of functional of the geopotential and their calculation from spherical harmonic models, *Helmholtz-Zentrum Potsdam - Deutsches GeoForschungsZentrum – Scientific Technical Report STR09/02*, 2009, 32 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.В. Бабиченко.

**Джанджгава Гиви Ивлианович** – АО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро»; e-mail: rpkb@rpkb.ru; 140103, Московская обл., г. Раменское, ул. Гурьева, 2; тел.: 84964633932; д.т.н.; Генеральный конструктор; Президент ОАО «РПКБ».

**Сазонова Татьяна Владимировна** – e-mail: tatsazonova@mail.ru; тел.: 89166834878; д.т.н.

**Dzhandzhgava Givi Ivlianovich** – JSC “Ramenskoye Design Company”; e-mail: rpkb@rpkb.ru; 2, Gurieva street, Ramenskoye, Moscow Region, 140103; phone: 84964633932; dr. of eng. sc.; President; General designer.

**Sazonova Tatiana Vladimirovna** – e-mail: tatsazonova@mail.ru; phone: +79166834878; dr. of eng. sc.

УДК 629.127

**В.В. Костенко, Д.Н. Михайлов**

#### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИЖИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТА ДАЛЬНОСТИ ХОДА АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

*Приведены результаты исследований, направленных на улучшение тактико-технических характеристик автономных необитаемых подводных аппаратов за счет более точного определения дальности хода и времени автономной работы на этапе технического проектирования изделия. Известна расчетная методика, позволяющая определять параметры автономности автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при допущениях о постоянстве коэффициентов полезного действия (КПД) гребного электропривода и гребного винта. На практике КПД гребного винта неизменного шага будет зависеть от частоты вращения и скорости хода АНПА относительно воды. При этом эффективность гребного электропривода также не постоянна и зависит от частоты вращения и момента нагрузки на валу. Целью настоящей статьи является разработка методики уточненного расчета автономности подводного аппарата, учитывающей изменение коэффициентов полезного действия компонентов движителя во всем диапазоне скоростей хода. Для этого проведена оценка гидродинамического сопротивления АНПА, определены параметры гребного винта неизменного шага маршевого движителя, получены в ходе нагрузочных испытаний экспериментальные характеристики электропривода маршевого*